



VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ–TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
VŠB–TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER
SCIENCE



KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

Problematika bezpečnostního rizika implementace AWG v přístupových sítích

The Issue of Security Risks in Next-Generation Op- tical Access Networks

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Martin Navalný

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Koudelka

2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Navalaný**
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika
Téma: **Problematika bezpečnostního rizika implementace AWG v přístupových sítích**
The Issue of Security Risks in Next-Generation Optical Access Networks
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Optické fázové pole AWG představuje důležitý prvek sítí nové generace WDM-PON. Absolventská práce se věnuje bezpečnostní problematice tohoto prvku na úrovni fyzické vrstvy.

1. Popište technologii pasivní optické sítě nové generace WDM-PON.
2. Popište konstrukci a vlastnosti optického multiplexeru AWG. Tyto vlastnosti laboratorně ověřte.
3. Z naměřených vlastností optického multiplexeru AWG (WDM-PON) sestavte model technologie WDM-PON v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem a ověřte bezpečnost rizika kanálového přeslechu.
4. V simulačním prostředí Optiwave OptiSystem využijte kanálového přeslechu s pomocí optických zesilovačů (EDFA, SOA, případně GS-EDFA) pro sestavení komunikačního řetězce OLT-ONU.
5. V laboratoři optických přístupových sítí proveďte reálné sestavení modelu využití přeslechu AWG a porovnejte reálné výsledky s výsledky ze simulačního prostředí.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] PRAT, Josep. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research towards unlimited bandwidth access*. Barcelona: Springer, 2008. 187 p. ISBN 978-1-4020-8469-0.

LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 15.07.2016



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 6. července 2016


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Koudelkovi za trpělivost, odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Také bych rád poděkoval svoji rodině, která mě po celou dobu studií podporovala.

ABSTRAKT

V dnešním světě se velké množství informací přenáší přes počítačové sítě. Tyto sítě ve velké míře už nejsou tvořeny metalickými vedeními, ale nahradili je optické kabely. Jelikož jsou přenášená data mnohdy důvěrná, ať už se jedná o osobní či pracovní data, je důležité zaručit jejich bezpečný přesun od odesílatele k příjemci. Což znamená, aby tyto data nikdo při přesunu nemohl nijak pozměnit, či je dokonce zachytit a odposlechnout. A právě problematikou odposlechů v optických sítích se zabývá má práce. Přesněji se zabývám problematikou přeslechu v sítích typu WDM-PON, konkrétně na optickém multiplexoru AWG, který je nepostradatelnou součástí většiny optických sítí. K ověřování zda lze využít přeslechů k získání přenášených dat použiji software OptiSystem 14 od firmy Optiwave a také provedu reálné měření v laboratoři.

KLÍČOVÁ SLOVA

AWG; WDM; zesilovač; EDFA; simulace

ABSTRACT

In today's world a large amount of information is transmitted over the computer network. These networks are largely no longer formed by a metallic line, but they are replaced by optical fiber cables. Because the transmitted data are often confidential, whether personal or professional data, it is important to guarantee their safe transfer from sender to recipient. This means that nobody should be able to change these data, or even intercept and eavesdrop them. And the issue of wiretaps in optical networks is engaged in my work. More specifically it deals with the issue of crosstalk in WDM-PON, namely optical multiplexer AWG, which is an essential component of most fiber optic networks. To verify that crosstalk data can be used to obtain transmitted data I will use software OptiSystem 14 from Optiwave and also I will make real measurements in the laboratory.

KEYWORDS

AWG; WDM; amplifier; EDFA; simulation

OBSAH

1	Úvod	12
2	Popište technologii pasivní optické sítě nové generace WDM-PON	13
2.1	Prvky používané v pasivních optických sítích	14
2.1.1	Optické linkové zakončení	14
2.1.2	Optická distribuční síť	14
2.1.3	Optická síťová jednotka	15
2.1.4	Optický síťový zakončovač	15
2.1.5	Optický rozbočovač	15
2.2	Optické zdroje	16
2.3	Optické zesilovače	16
2.3.1	Zesilovač EDFA	16
2.3.2	Zesilovač SOA	22
2.4	Optické detektory	24
2.5	Varianty WDM-PON	25
2.5.1	WWDM	25
2.5.2	CWDM	25
2.5.3	DWDM	26
2.6	Typy WDM-PON	26
2.6.1	Možné realizace WDM-PON	27
3	Popište konstrukci a vlastnosti optického multiplexoru AWG	28
3.1	Konstrukce AWG	28
3.2	Přeslechy	29
4	Příprava k měření	31
4.1	Použité přístroje a součástky	31
5	Simulace a reálné měření	38
5.1	Zapojení s EDFA	38
5.1.1	Simulace	38
5.1.2	Reálné měření	44
5.2	Zapojení se SOA	46
5.2.1	Simulace	46
5.2.2	Reálné měření	51
5.3	Zapojení se 2xSOA	53
5.3.1	Reálné měření	53
5.4	Zapojení se SOA+EDFA	54
5.4.1	Simulace	54

5.4.2	Reálné měření	56
6	Závěr	58
	Literatura	59

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

c	rychlost světla
δ	parciální derivace
dS	průřez vlákna
dz	tloušťka vlákna
E	energetická hladina
E_1	1. energetická hladina
E_2	2. energetická hladina
E_3	3. energetická hladina
E_{HB}	energie nehomogenity
E_N	energie iontu
E_T	energie v čase
f_λ	příčného rozložení pole
f_s	normovaná intenzita pole signálu
G	integrovaný zisk
Γ	překryvový faktor
g_0	počáteční zisk
g_{HB}	zisk na nehomogenitě
g_m	materiálový zisk
g_N	zisk iontu
g_T	zisk v čase
h	Planckova konstanta
I_λ	intenzita signálu
I_s	intenzita signálu
L	vzdálenost
M	počet módů šířících se vláknem
N_1	vstupní koncentrace iontů
N_2	výstupní koncentrace iontů
N_r	změřený koncentrační profil
P_0	počáteční výkon
P_L	výkon v určité vzdálenosti
P_P	výkon překryvového faktoru
P_s	výkon signálu
P_{sat}	saturační výkon
σ_a	absorpční účinný průřez
σ_e	emisní účinný průřez
σ_e	spontánní emisní účinný průřez
τ_2	doba setrvání v 2. energetické hladině
v_s	rychlost signálu

W_a	rychlost absorpce
W_e	rychlost stimulované emise
W_p	rychlost absorpce na 3. energetickou hladinu
W_z	Lamberská W funkce
APD	Lavinová fotodioda
ASE	Zesílená spontánní emise
ATM	Asynchronní dopravní režim
AWG	Uspořádaná mřížka vlnovodů
BER	Bitová chybovost
CWDM	Hrubý vlnový multiplex
DFB laser	Laser s distribuovanou zpětnou vazbou
DWA	Dynamické přidělování vlnových délek
DWDM	Hustý vlnový multiplex
EDF	Erbiem dopované vlákno
EDFA	Erbiem dopovaný vláknový zesilovač
FBT	Dvoukružkový slučovač
FP laser	Fabry – Perotův laser
FPR	Oblast volného šíření prostorem
IP	Internetový protokol
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MLM	Mnohonásobný podélný režim
ITU-T	Telekomunikační standardizační sektor mezinárodní telekomunikační unie
OADM	Optický add-drop multiplexor
ODN	Optická distribuční síť
OLT	Optické linkové zakončení
ONT	Optický síťový zakončovač
ONU	Optická síťová jednotka
OSI	Propojení otevřených systémů
OSNR	Odstup optického signálu od šumu
OWR	Optický vlnově délkový směrovač
PIN	Fotodioda s přidaným pásem I
PON	Pasivní optická síť
SDH	Synchronní digitální hierarchie
SML	Jednoduchý podélný režim
SOA	Polovodičový zesilovač
UDWDM	Ultra hustý vlnový multiplex
WDM	Vlnově dělený multiplex
WWDM	Široký vlnový multiplex

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Rozdělení optických přístupových sítí	13
2.2	WDM-PON architektura	14
2.3	Topologie optické distribuční sítě	15
2.4	Rozdělení optických zesilovačů podle pásma	17
2.5	Blokové schéma zesilovače EDFA [9]	17
2.6	Energetické hladiny Erbium [11]	18
2.7	Druhé provedení zapojení EDFA [11]	19
2.8	Širokopásmové zapojení EDFA s vyrovnáním zisku [11]	19
2.9	Paralelní širokopásmové zapojení EDFA [11]	20
2.10	infinitesimální změna optického výkonu v elementu vlákna [14]	21
2.11	Příčný řez strukturou SOA s heterogenními přechody [12]	22
2.12	Kanály CWDM definované dle ITU-T G694.2 [8]	26
3.1	AWG [10]	28
3.2	Možnosti využití AWG [10]	29
3.3	Rozložení prvních tří kanálů v L pásmu	30
4.1	Rozsah zesílení zesilovače EDFA	32
4.2	Signál bez zesílení	33
4.3	Signál po zesílení SOA1117P	33
4.4	Signál po zesílení BOA1080S	34
4.5	Výstup z OLT v C pásmu	35
4.6	Výstup z OLT v L pásmu	35
4.7	Výstup z AWG 1. C kanál	36
4.8	Výstup z AWG 1. L kanál	36
4.9	Zpětný signál z ONU	37
4.10	Výstup z AWG ve zpětném směru	37
5.1	Schéma zapojení reálného měření	38
5.2	Simulace s EDFA zesilovačem	39
5.3	Spektrální charakteristika FP laseru v C pásmu	40
5.4	Spektrální charakteristika FP laseru v L pásmu	40
5.5	Výstup z AWG – 1. kanál	41
5.6	Výstup z AWG – 2. Kanál	41
5.7	Výstup ze zesilovače EDFA	42
5.8	Diagram oka za ONU	42
5.9	Zpětný směr bez zesílení	43
5.10	Diagram oka ve zpětném směru	43
5.11	Schéma měření se zesilovačem EDFA	44
5.12	Výstup ze zesilovače EDFA se zesílením 10 dB	45
5.13	Výstup ze zesilovače EDFA se zesílením 15 dB	45

5.14 Výstup ze zesilovače EDFA se zesílením 25 dB	46
5.15 Simulace se SOA zesilovačem	47
5.16 Výstup ze SOA s polovičním zesílením	48
5.17 Výstup ze SOA s maximálním zesílením	48
5.18 Diagram oka při polovičním zesílení	49
5.19 Diagram oka při maximálním zesílení	49
5.20 Zpětný směr při polovičním zesílení	50
5.21 Zpětný směr při maximálním zesílení	50
5.22 Diagram oka ve zpětném směru a při maximálním zesílení	51
5.23 Schéma měření s polovodičovým zesilovačem	51
5.24 Výstup z polovodičového zesilovače v C pásmu	52
5.25 Výstup z polovodičového zesilovače v L pásmu	52
5.26 Schéma měření s dvěma polovodičovými zesilovači	53
5.27 Schéma měření s dvěma polovodičovými zesilovači	53
5.28 Signál za dvojici zesilovačů	54
5.29 Diagram oka za ONU	54
5.30 Simulace se SOA a EDFA zesilovačem	55
5.31 Schéma měření se SOA a EDFA zesilovači	56
5.32 Výstup ze SOA a EDFA zesilovačů se zesílením 10 dB	56
5.33 Výstup ze SOA a EDFA zesilovačů se zesílením 15 dB	57
5.34 Výstup ze SOA a EDFA zesilovačů se zesílením 20 dB	57

SEZNAM TABULEK

4.1	Specifikace zesilovače SOA1117P [14]	31
4.2	Specifikace zesilovače BOA1080S [13]	31
4.3	Specifikace zesilovače EDFA CLA PB01F [6]	32

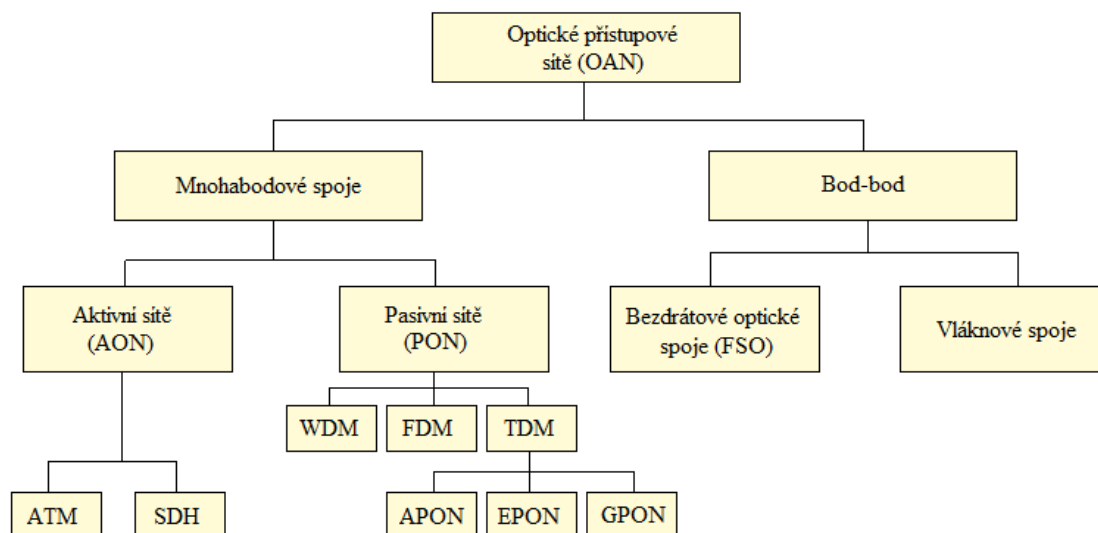
1 ÚVOD

Problematika bezpečnosti je stará jako lidstvo samo a je aktuální až do dnešní doby a bude tomu tak i v budoucnu. Na bezpečný přenos informací je kladen velký důraz, jelikož právo na soukromí je dáno ústavou a také velké množství přenášených informací je nějakým způsobem důvěrných, ať už se jedná o věci soukromé, korporátní či věci národní bezpečnosti. Jelikož se dnes velké množství informací posílá přes optické sítě, je potřeba, aby tyto sítě byly spolehlivé a maximálně bezpečné. Bezpečnost optických sítí z pohledu odposlechu během přenosu po vláknech je všeobecně známa a uznávána, ale jak je to z bezpečnosti zbytku optické trasy se nemluví. V mé práci se zaměřuju nebezpečnost v populárních sítích WDM-PON. Jedná se o pasivní optickou síť, ve které se pro přenos používá vlnový multiplex, což znamená, že po jednom vláknech se přenáší několik různých datových toků ve stejném okamžiku. Ve WDM-PON sítích jsem se zaměřil na jeden potenciálně nebezpečný prvek a tím je AWG, což je vlastně multiplexor/demultiplexor složený z mnoha vlnovodů a tím rozděluje jednotlivé signály o různých vlnových délkách. Jelikož se ale jednotlivé kanály v novějších systémech čím dál tím více přibližují k sobě, abychom mohli najednou obsloužit co nejvíce účastníků, tak mohou na AWG vznikat přeslechy mezi jednotlivými kanály. To znamená, že když probíhá komunikace na prvním kanále, lze tuto komunikaci najít i na kanále druhém, ale v utlumené podobě. Mým úkolem je zjistit nakolik jsou tyto přeslechy utlumené a zda je možné je zesílit, zrekonstruovat a zda je možné zjistit, jaké informace byly přenášeny. Kdyby se potvrdilo, že toto je možné, mělo by velmi vážný dopad na tyto sítě a musela by se tato situace nějakým způsobem řešit, protože by se jednalo o velký zásah do soukromí, kdyby někdo tyto odposlechy realizoval.

V první části mé práce se zabývám popisem technologie pasivní optické sítě, což znamená popis prvků používaných v těchto sítích, optických zdrojů, zesilovačů a detektorů. Poté různé typy a principy WDM technologie. V další části je podrobněji popsán optický multiplexor AWG, jeho konstrukce a vlastnosti. Poté už je praktická realizace problematiky v podobě simulací v specializovaném programu a v poslední části se jedná o praktické měření přímo na síti a porovnání výsledků dosažených v simulacích a praktickým měřením.

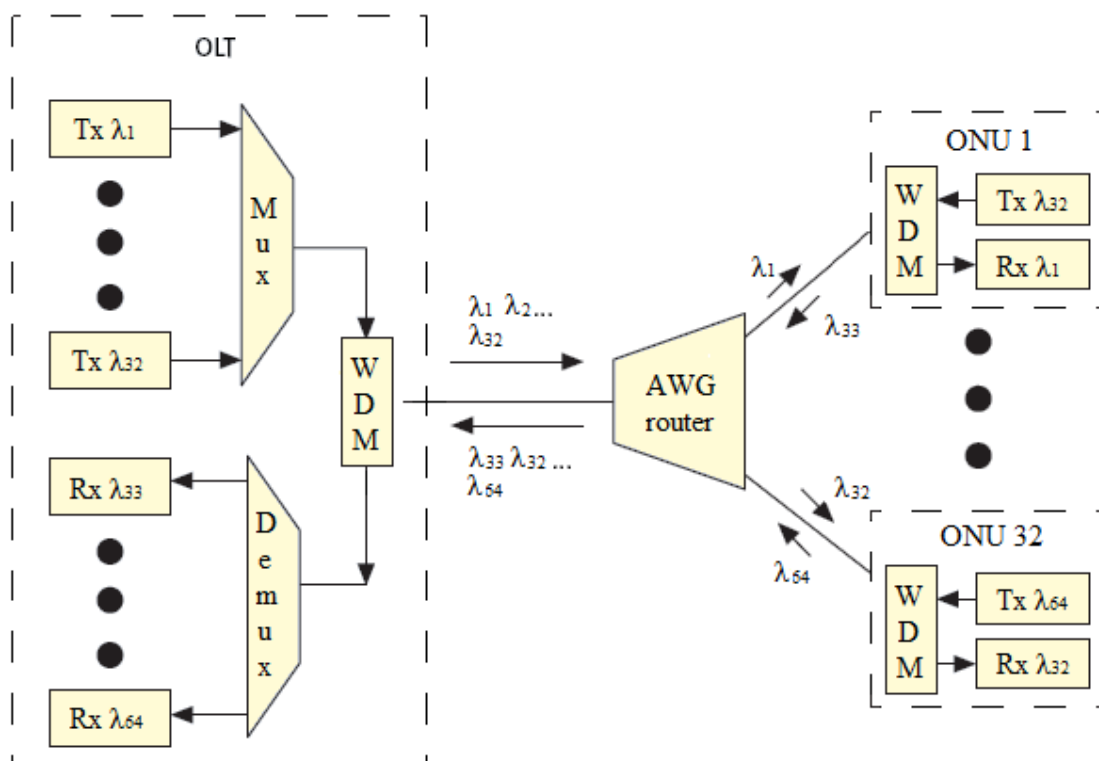
2 POPIŠTE TECHNOLOGII PASIVNÍ OPTICKÉ SÍTĚ NOVÉ GENERACE WDM-PON

Optické přístupové sítě se dělí na mnoho částí (obrázek 2.1). V této práci se budu podrobněji věnovat jen pasivním sítím, především WDM sítím.



Obr. 2.1: Rozdělení optických přístupových sítí

Pasivní optické sítě PON představují jeden z nejvýznamnějších směrů v nasazování optických přístupových sítí. Pasivní proto, že mezi ústřednou poskytovatele internetového připojení a koncovým zákazníkem není nutno používat žádné aktivně napájené síťové prvky. Významnou výhodou jsou nižší náklady na výstavbu a provoz oproti sítím aktivním. U sítí pasivních dochází jak k úspoře počtu tažených optických vláken (sdílení přenosové šířky jednoho vlákna více účastníky), tak vybavení potřebného pro fungování sítě (zjednodušení síťových prvků v ústředně poskytovatele). Důležitou předností WDM je také možnost transparentního přenosu optických kanálů o rychlostech od 140 Mbit/s až po 10 Gbit/s. S použitím WDM je tedy možné budovat páteřní síť ATM či IP, ve kterých by jednotlivé uzly byly propojeny vyššími rychlostmi, než nabízí současná technologie SDH. Maximální dosah sítě WDM je přibližně 120 km. Pokud je trasa delší než 120 km, je nutné vložit jeden či více mezilehlých zesilovačů. Zesilovač všechny kanály v signálu WDM zesiluje najednou, plně opticky, tato analogová podstata zesílení ovšem vede k narůstání šumu podél trasy a tudíž lze kaskádovat jen asi 7 mezilehlých zesilovačů s celkovým dosahem bez regenerace cca 640 km [1] [2] [9].



Obr. 2.2: WDM-PON architektura

2.1 Prvky používané v pasivních optických sítích

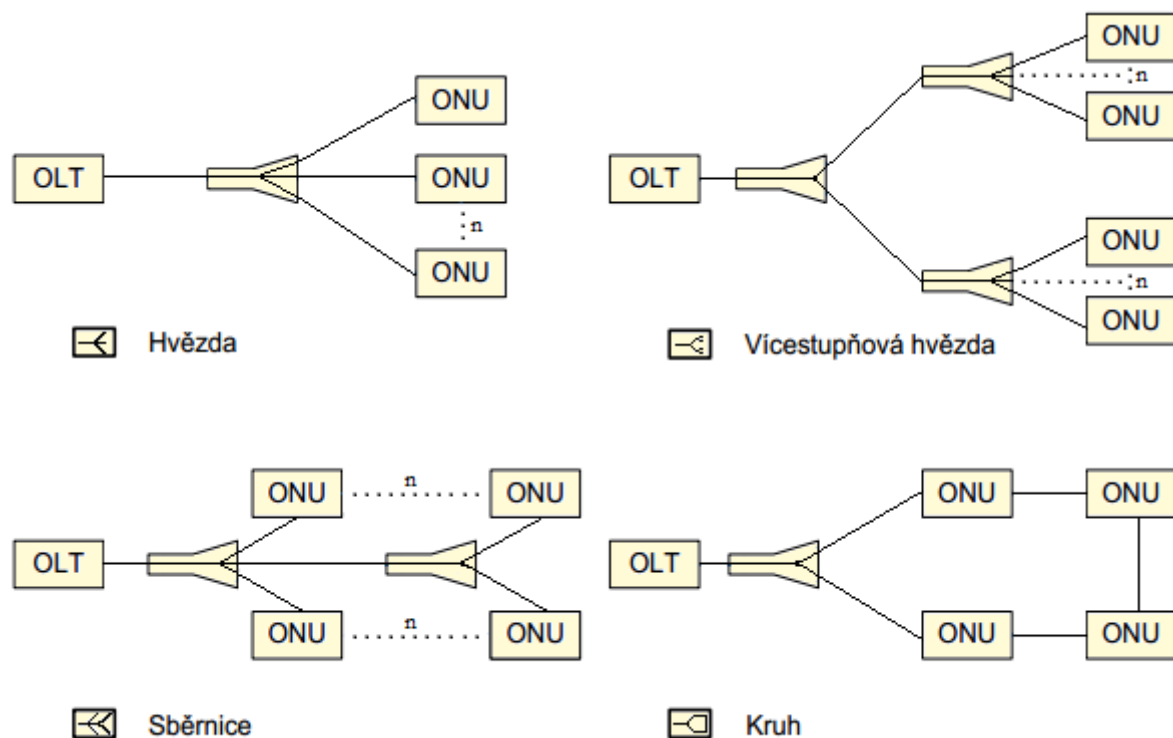
2.1.1 Optické linkové zakončení

Optical Line Termination (OLT) je zařízení, které slouží k zakončení linky na straně internetového poskytovatele. Jeho úkolem je konvertovat elektrický signál na optický (a zpět) a multiplexování/demultiplexování signálu přenášeného prostřednictvím optického vlákna. Také se stará o všechny náležitosti potřebné pro fungování sítě vyplývající z 1. (fyzické), 2. (spojové) a 3. (síťové) vrstvy modelu ISO/OSI. Také má na starosti správu a dohled nad koncovými jednotkami ONU a ONT [1] [2].

2.1.2 Optická distribuční síť

Optical Distribution Network (ODN) je souborem prostředků (vlákna, spojky, síťové prvky atd.) pro přenos mezi OLT a ONU. ODN má několik možností jak může být uspořádána, což názorně ukazuje obrázek 2.3. Topologie hvězdy se v dnešní době už nepoužívá, v praxi se nejvíc setkáme se zapojením víceúhlové hvězdy pro připojení domácností. Topologie typu sběrnice najdeme nejčastěji na školách pro univerzitní či jiné výzkumné účely. Kruhové zapojení můžeme realizovat v podnikových sítích, především když chceme

sít oddělit od vnější sítě pro uchování citlivých dat a zároveň toto zapojení také poskytuje vysokorychlostní spojení v rámci této sítě. Uvedené topologie jsou pouze základní a není problém poskládat jich několik dohromady a vytvořit složitější síť přesně na míru zákazníkovi. Jediným limitujícím parametrem je celkový útlum trasy, s čímž úzce souvisí i maximální délka trasy [1] [2] [3].



Obr. 2.3: Topologie optické distribuční sítě

2.1.3 Optická síťová jednotka

Optical Network Unit (ONU) je zařízení, které zakončuje pasivní optickou přístupovou síť na straně zákazníků a stará se o převod signálu (a celkově přenos síťového provozu) mezi domácí sítí koncových zákazníků a přístupovou sítí [1] [2] [3].

2.1.4 Optický síťový zakončovač

Optical Network Terminal (ONT) je speciálním typem ONU, které zprostředkovává služby specificky pro jednoho zákazníka [1] [2] [3].

2.1.5 Optický rozbočovač

Splitter je jednoduché nenapájené zařízení, které umožňuje sdílet více zákazníkům přenosovou šířku jednoho optického vlákna. Přidání každého rozbočovače způsobí zvýšení

vložného útlumu na trase. Vzhledem k tomu, že na trase se nenachází žádné optické zesilovače nebo regenerátory je jejich počet a velikost útlumu jedním ze základních parametrů limitujících vzdálenost mezi uživatelem a centrální ústřednou. Splitter v základu spojuje/rozděluje vždy pouze 2 optická vlákna. Většího rozdělení se musí dosáhnout kaskádovitým řazením splitterů za sebe (toho se může dosáhnout na jedné destičce s planární technologií výroby nebo použitím rozbočovačů s FBT technologií výroby a jejich postupným ručním řazením za sebe) [1] [2] [3].

2.2 Optické zdroje

Jelikož jsou optické zdroje velmi důležitou součástí WDM-PON sítí je jim věnována následující podkapitola. Základními požadavky na zdroje záření užívané v systémech WDM jsou:

- Výkon - výkon zdroje musí být alespoň takový, aby signál prošel vláknem a přijímaný detektorem byl s požadovanou přesností detekovatelný.
- Přenosová rychlost - k dosažení požadované přenosové rychlosti musí zdroj umožnit odpovídající modulaci.
- Nominální poloha středu spektrální čáry a její šířka - oproti běžným jednokanálovým systémům jsou přenosové systémy WDM velmi náročné na stabilitu jednotlivých nosných frekvencí. Spektrální čára zdrojů záření se nesmí vlivem změn teploty ani jiných okolností posunout do polohy příslušející jiným kanálům a musí být také dostatečně úzká, aby nezasahovala do sousedních kanálů a také pro minimalizaci chromatické disperze při šíření signálu podél vlákna.
- Šum - zdroj nesmí vykazovat náhodné fluktuace.

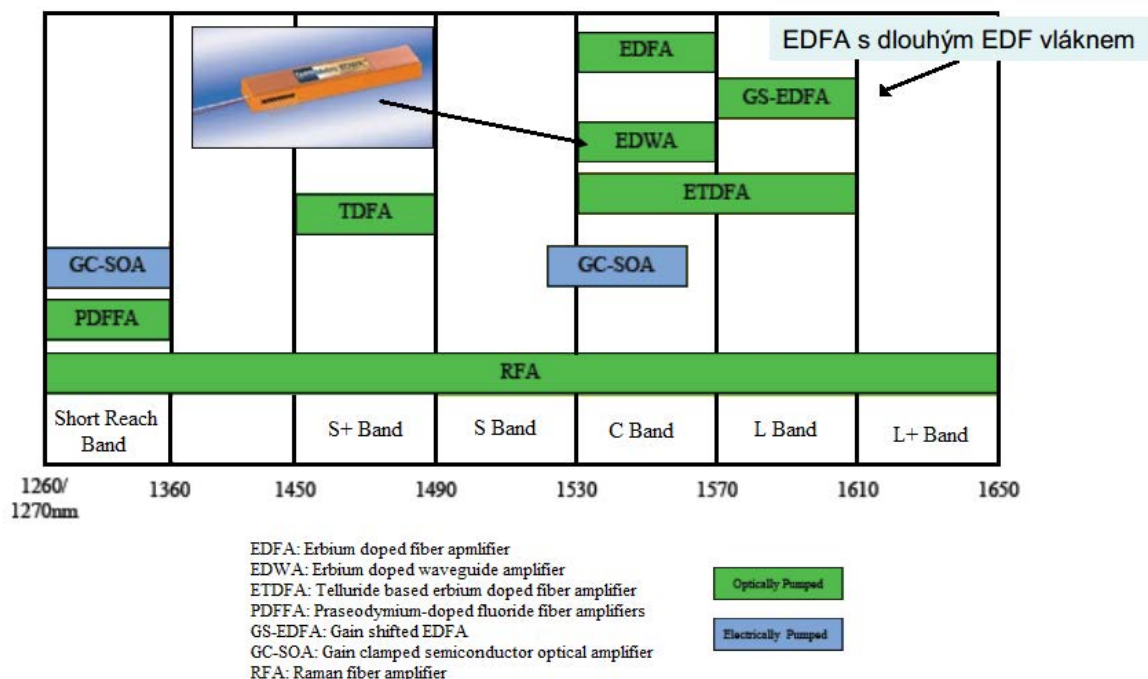
Dále se vyžaduje mechanická odolnost, necitlivost na změny okolního prostředí, spolehlivost, nízká cena a dlouhá životnost [9].

2.3 Optické zesilovače

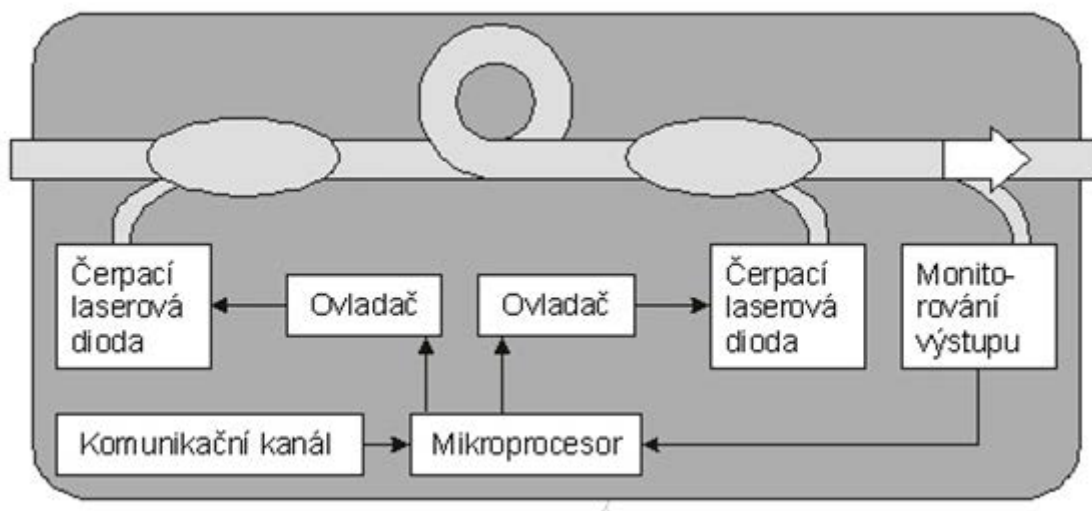
Optický zesilovač je jednou z klíčových komponent WDM technologie, protože umožňuje zesílit všechny příspěvkové optické kanály ve WDM signálu najednou a umí to bez převodu optického signálu na elektrický a zpět na optický, což znamená bitovou a protokolovou nezávislost. Více popíšu princip funkce polovodičového(SOA) a vláknového zesilovače (EDFA), jelikož jsem je používal v praktické části práce a také protože je EDFA v současnosti nejvhodnějším a také nejužívanějším optickým zesilovačem pro WDM. Na obrázku 2.4 vidíme rozdělení zesilovačů podle spektra, které zesilují [9].

2.3.1 Zesilovač EDFA

Jádrem EDFA je určitá délka vlákna. Toto vlákno (EDF) je navařeno do optické trasy s užitečným signálem WDM přes směrové odbočnice na obou svých koncích. Přes další

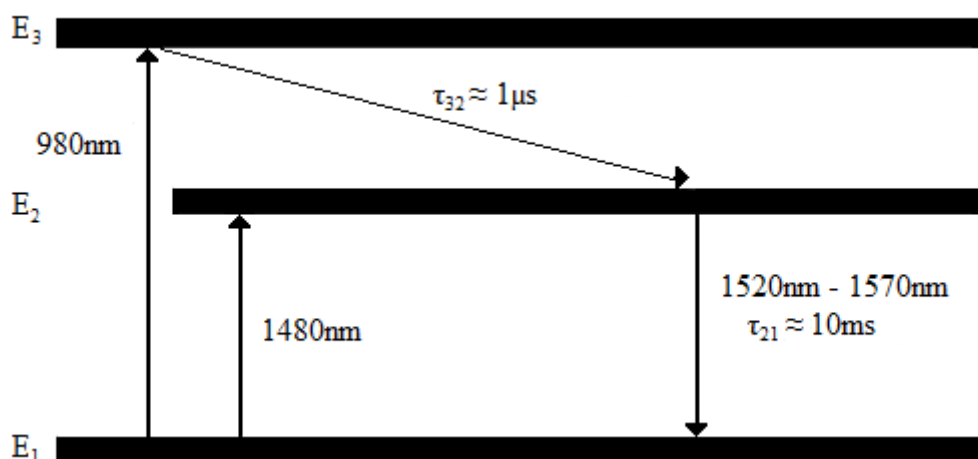


Obr. 2.4: Rozdělení optických zesilovačů podle pásma



Obr. 2.5: Blokové schéma zesilovače EDFA [9]

vstup směrových odbočnic je do EDF zaveden další, tzv. čerpací kanál z čerpacích laserových diod. Čerpací diody tak do EDF dodávají energii na vlnové délce např. 980 nm, kterou ionty erbia velmi efektivně absorbují a dostanou se do vzbuzeného neboli excitovaného stavu. Procesem vnitřní relaxace se vzápětí dostanou do poněkud nižší energetické hladiny, která odpovídá energii fotonů na vlnové délce v okolí 1550 nm. Tak vznikne aktivní prostředí s pozitivní inverzí, nezbytné pro laserovou akci. Ionty erbia nyní deexcitují



Obr. 2.6: Energetické hladiny Erbium [11]

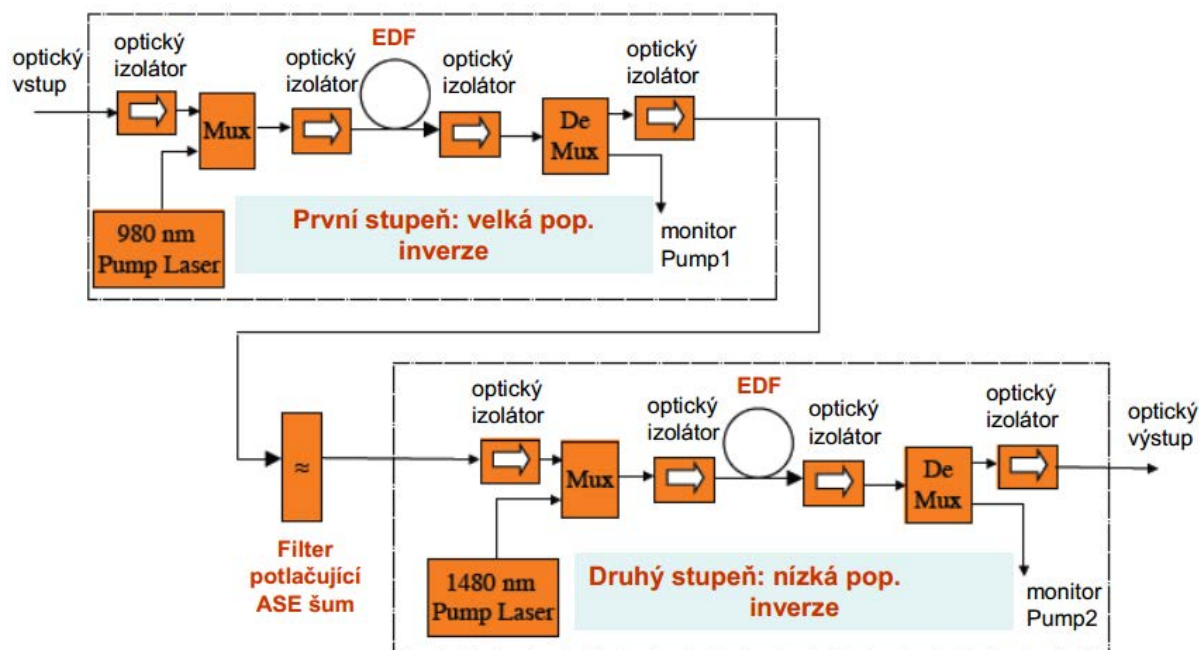
jednak spontánně, tzv. spontánní emisí, a jednak stimulovanou emisí, kterou stimuluje přítomný užitečný signál WDM. Spontánní emise je parazitním jevem a za normálních podmínek ji stimulovaná emise vysoce převyšuje a naprostá většina energie, načerpané do iontů erbia, která nebyla ztracená relaxací, se tak spotřebuje na zesílení užitečného signálu. Tento princip lze vidět na obrázku 2.8 [9].

Jak je vidno z obrázku, elektrony na hladině E_3 dlouho nevydrží a po $1 \mu\text{s}$ přechází na metastabilní hladinu E_2 , tento přechod je nezářivý. Při přechodu mezi E_2 a E_1 už dochází k vyzáření fotonu, který má energii:

$$E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda}. \quad (2.1)$$

EDFA založený na principu vysvětleném výše může dobře sloužit pro zesilování světla jednoho optického kanálu. Aby však byl úspěšně použitelný i ve WDM aplikacích, musí mít ještě další vylepšení. Předně zisk vlnového zesilovače není stejný pro všechny vlnové délky, ale tvoří spektrální pás. Pro aplikace WDM je nutné, aby zisk zesilovače byl přibližně konstantní na celém spektrálním oboru signálu WDM, tj. aby se každý z optických kanálů zesiloval stejně. Během přenosu dálkovou trasou obvykle signál postupně prochází několika zesilovači a jejich přenosová funkce se násobí a případné rozdíly ve spektrálním profilu zisku by se stávaly ještě významnějšími, až by to mohlo vést k příliš malému poměru signál/šum pro některé kanály. Další požadavky na zesilovač pro WDM jsou už shodné s požadavky na běžné zesilovače: dostatečný zisk při nízkém šumovém čísle, teplotní stabilita, spolehlivost a co nejnižší cena. Tyto požadavky mohou být řešeny uspořádáním EDFA podle obrázku 2.6. Čerpání, které je nejslabším článkem EDFA, je zdvojené, a je tak dosaženo dostatečné spolehlivosti. Nezávislosti na teplotě lze dosáhnout teplotní stabilizací čerpacích diod. Výstupní výkon zesilovače je monitorován, a to v celé spektrální oblasti, kde se nacházejí jednotlivé kanály. Naměřené hodnoty jsou analyzovány

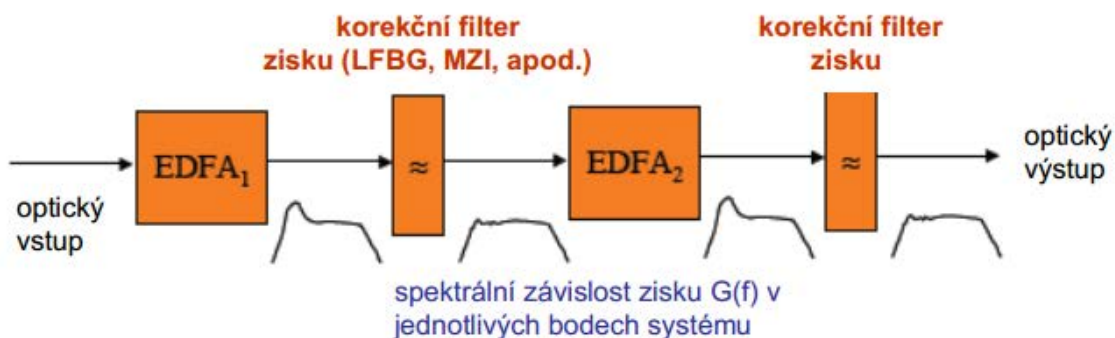
mikroprocesorem, který řídí ovladače čerpacích diod. Touto zpětnou vazbou lze dosáhnout nezávislost výstupního výkonu na každém kanále na spektrální pozici kanálu, na vstupním výkonu každého kanálu i na celkovém počtu kanálů [9]. EDFA může být sestavena v různých provedeních. První je klasické zapojení a zobrazuje jej obrázek 2.5. Druhá možnost je dvojitě zapojení (obrázek 2.7). Také se ještě používá širokopásmové zapojení s



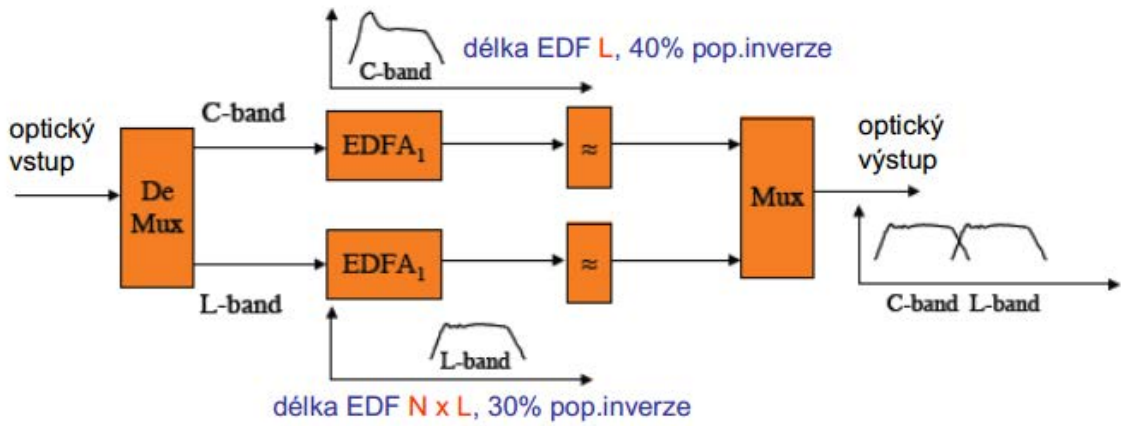
Obr. 2.7: Druhé provedení zapojení EDFA [11]

vyrovnáním zisku (obrázek 2.8) a v paralelním zapojení (obrázek 2.9).

Výpočet zesílení EDFA spočívá v řešení vázaných rovnic popisujících obsazení atomových hladin (rychlostní rovnice) a šíření světla vláknem (rovnice šíření). Jako první si



Obr. 2.8: Širokopásmové zapojení EDFA s vyrovnáním zisku [11]



Obr. 2.9: Paralelní širokopásmové zapojení EDFA [11]

uvedeme rychlostní rovnice:

$$\frac{dN_2}{dt} = W_p N_1 + W_a N_1 - \frac{N_2}{\tau_2} - W_e N_2, \quad (2.2)$$

$$N_1 = N_{tot}^{Er} - N_2, \quad (2.3)$$

$$W_p(r, \varphi, z, t) = \sigma_p(\lambda) \frac{I(r, \varphi, z, t, \lambda_p)}{h\nu_p}, \quad (2.4)$$

$$W_a(r, \varphi, z, t) = \int_0^\infty \sigma_a(\lambda) \frac{I_\lambda(r, \varphi, z, t, \lambda)}{h\nu} d\lambda, \quad (2.5)$$

$$W_e(r, \varphi, z, t) = \int_0^\infty \sigma_e(\lambda) \frac{I_\lambda(r, \varphi, z, t, \lambda)}{h\nu} d\lambda. \quad (2.6)$$

Jako další si uvedeme rovnici šíření monochromatického signálu. Rovnice šíření signálu $I_s(r, \varphi, z, t, \lambda_s)$ lze odvodit z infinitesimální změny optického výkonu v elementu vlákna o tloušťky dz a průřezu dS (obrázek 2.10):

V elementu $dSdz$ je počet iontů ve stavu E_1 a E_2 : $N_1 dSdz$, $N_2 dSdz$ počet absorpcí za jednotku času:

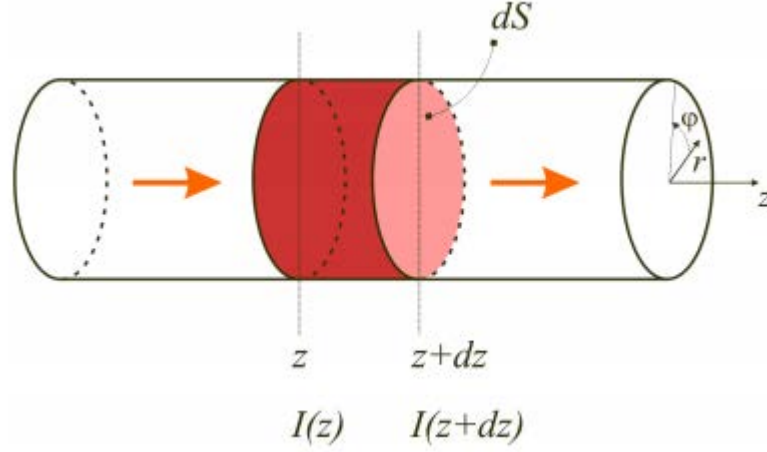
$$\frac{I_s}{h\nu_s} \sigma_a N_1 dSdz, \quad (2.7)$$

počet stimulovaných emisí za jednotku času:

$$\frac{I_s}{h\nu_s} \sigma_e N_2 dSdz, \quad (2.8)$$

celková změna energie za jednotku času (výkon):

$$\frac{I_s}{h\nu_s} (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) dSdz h\nu_s = I_s (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) dSdz. \quad (2.9)$$



Obr. 2.10: infinitesimální změna optického výkonu v elementu vlákna [4]

Tento výkon musí být roven celkovému výkonu vstupujícímu do elementu $dSdz$:

$$I_s(z)dS - I_s(z+dz)dS = (I_s(z) - I_s(z) - \frac{dI_s}{dz}dz)dS = -\frac{dI_s}{dz}dSdz. \quad (2.10)$$

Důležitým parametrem je taky šum ASE a ten se dá popsat v dopředném směru následující rovnicí:

$$\frac{dI_{\lambda}^{ASE+}(z, \lambda)}{dz} = (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1)I_{\lambda}^{ASE+} + 2Mh\nu\Delta\nu\sigma_e N_2 f_{\lambda} \quad (2.11)$$

a ve zpětném směru:

$$\frac{dI_{\lambda}^{ASE-}(z, \lambda)}{dz} = -(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1)I_{\lambda}^{ASE-} - 2Mh\nu\Delta\nu\sigma_e N_2 f_{\lambda}. \quad (2.12)$$

Rovnice šíření - překryvový faktor:

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = I_s(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) / \int_S dS \quad (2.13)$$

$$LS : \int_S \frac{d(P_s(z, t)f_s(r))}{dz} dS = \frac{dP_s(z)}{dz} 2\pi \int f_s(r)rdr = c \frac{dP_s(z)}{dz}, \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} PS : \int_S I_s(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) dS &= 2\pi \int_r P_s(z, t)f_s(r)(\sigma_e N_2(z, t)\frac{N(r)}{N_t} - \sigma_a N_1(z, t)\frac{N(r)}{N_t})rdr = \\ &= P_s(z, t)(\sigma_e N_2(z, t) - \sigma_a N_1(z, t))2\pi \int_r f_s(r)\frac{N(r)}{N_t}rdr \Rightarrow 2\pi \int_r f_s(r)\frac{N(r)}{N_t}rdr = \Gamma \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = P_s \Gamma_s(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1), \quad (2.16)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = -P_P \sigma_a N_1 \Gamma_P, \quad (2.17)$$

$$\frac{dP_{\lambda}^{ASE-+}(z, \lambda)}{dz} = + - P_{\lambda}^{ASE-+} \Gamma_{\lambda}(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) + -2h\nu\Delta\nu\sigma_e N_2 \Gamma_{\lambda}, \quad (2.18)$$

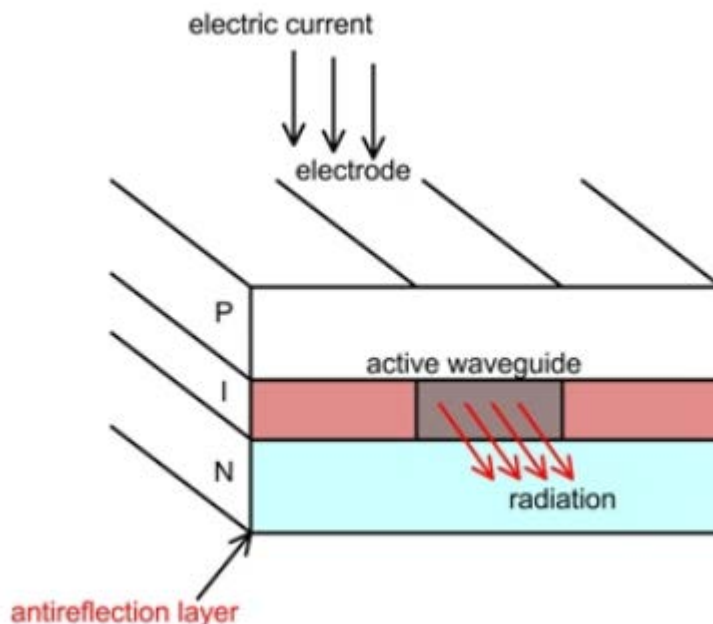
[4].

2.3.2 Zesilovač SOA

Zisk polovodičového zesilovače je generován ve struktuře polovodiče nikoliv v materiálu optického vlákna jako v případě EDFA zesilovače nebo Ramanova zesilovače. Čerpání také není optické, je třeba dodat energií v podobě budícího elektrického pole (v praxi v podobě elektrické energie). Polovodičové materiály vhodné pro konstrukci optického zesilovače jsou například:

- GaAs
- AlGaAs
- InGaAs
- InGaAsP
- InAlGaAs
- InP

Tyto materiály se vyznačují dobrou kvantovou účinností, která zaručuje maximální počet generovaných fotonů vztážen k počtu excitovaných nosičů náboje [12]. Polovodičové zesilovače jsou vyráběny jako čip umístěný do standardního pouzdra, které umožňuje regulaci teploty, jenž zaručuje stabilitu (nebo naopak ladění) pracovní vlnové délky a možnost dosažení maximálního zisku. Kolem aktivní vrstvy se nachází plášťová vrstva. Velká koncentrace nosičů náboje v aktivní oblasti vede ke zvýšení indexu lomu v této oblasti, který je větší než v plášti. Tento region funguje jako vlnovod pro nově vytvořené fotony [12].



Obr. 2.11: Příčný řez strukturou SOA s heterogenními přechody [12]

Struktura SOA zesilovače je podobná Fabry-Pérot laseru, s tím rozdílem, že laser je vybaven reflexní plochou rezonátoru, která slouží pro násobení výkonu a spolu s mřížkou

k selekci vidů. SOA zesilovač je vybaven antireflexními vrstvy, které zabraňují vzniku rezonance generovaného záření a zvlnění výkonu v pracovním pásmu vlnových délek. Odrazy vedou ke zvlnění výkonu v generovaném spektru následkem rezonance (v případě mnohonásobných odrazů u laseru tento mechanismus vede k selekci vidů). Polovodič se pak chová jako zesilovač nikoliv jako laser, ve kterém záření rezonuje v rezonátoru pro vytvoření svazku o určitém uspořádání vidů. Antireflexní vrstvou je v praxi dielektrický materiál na čele čipu. Antireflexní vrstva má odrazy nižší než 0,001 %, proto záření vystupuje ze SOA bez odrazů a jeho míra je srovnatelná se ziskem media, ve kterém je generováno. Čelní plocha s antireflexní je šikmá, což dodatečně zabraňuje zpětnému odrazu. Tento typ SOA zesilovače je znám jako TWSOA (Travelling Wave SOA) [12]. SOA zesilovače pracují ve spektru 850 nm až 1600 nm a generují maximální zisk při optimální teplotě polovodiče (většinou kolem 18 až 30°C) až 30 dB. Většina komerčně dostupných SOA zesilovačů má zisk kolem 15-20 dB, ale dosahované zesílení signálu je ve skutečnosti ještě nižší (o několik decibel) kvůli značnému vloženému útlumu zesilovače, který je roven přibližně 5 dB. Tento útlum navíc narůstá při odpojení zesilovače z elektrické sítě. Další důležité parametry SOA zesilovače jsou:

- Polarizační citlivost - zisk SOA je závislý na polaritě vstupního světla, poněvadž vlnovod, ve kterém vzniká záření není symetrický.
- Šumové číslo - je poměr SNR na vstupu vůči poměru SNR na výstupu, zdrojem je spontánní emise záření.
- Dynamika zisku - Schopnost rychlé reakce na změny vstupního výkonu, tento parametr je důležitý pro vysokorychlostní systémy.
- Saturace zisku - dochází k ní při silném vstupním optickém signálu kvůli vyčerpání volných nosičů náboje v aktivní oblasti. Zisk pak s rostoucí hodnotou výkonu klesá. Hodnota saturačního výkonu je dána poklesem zisku o 3 dB od maximální hodnoty zisku [12].

Zisk polovodičového zesilovače můžeme popsat následující soustavou rovnic:

$$\delta_t g_N = \frac{g_0 - g_N}{\tau_N} - g_m \frac{P}{E_N}, \quad (2.19)$$

$$\delta_t g_T = -\frac{g_T}{\tau_T} - g_m \frac{P}{E_T}, \quad (2.20)$$

$$\delta_t g_{HB} = -\frac{g_{HB}}{\tau_{HB}} - g_m \frac{P}{E_{HB}}, \quad (2.21)$$

kde materiálový zisk má tři komponenty

$$g_m = g_N + g_T + g_{HB}. \quad (2.22)$$

Abychom našli stacionární řešení této soustavy rovnic položíme derivace rovny nule a rovnice sečteme

$$g_m = -g_m \left(\frac{\tau_N}{E_N} + \frac{\tau_T}{E_T} + \frac{\tau_{HB}}{E_{HB}} \right) P + g_0. \quad (2.23)$$

Saturovaný materiálový zisk je

$$g_m = \frac{g_0}{1 + \frac{P}{P_{sat}}}, \quad (2.24)$$

kde saturační výkon P_{sat} je definován jako

$$\frac{1}{P_{sat}} = \frac{\tau_N}{E_N} + \frac{\tau_T}{E_T} + \frac{\tau_{HB}}{E_{HB}}. \quad (2.25)$$

Rovnice pole

$$\delta_z P = g_m P = \frac{g_0 P}{1 + \frac{P}{P_{sat}}}, \quad (2.26)$$

může být ve stacionárním režimu snadno vyřešena metodou separace proměnných

$$\int_{P_0}^{P_L} \left(\frac{1}{P} + \frac{1}{P_{sat}} \right) dP = \int_0^L g_0 dz. \quad (2.27)$$

Máme

$$\ln \frac{P_L}{P_0} + \frac{P_L - P_0}{P_{sat}} = g_0 L. \quad (2.28)$$

Po exponenciaci dostaneme

$$\frac{P_L}{P_{sat}} \exp\left(\frac{P_L}{P_{sat}}\right) = \frac{P_0}{P_{sat}} \exp\left(g_0 L + \frac{P_0}{P_{sat}}\right). \quad (2.29)$$

Využitím definice Lambertovy W funkce

$$W(z) \exp(W(z)) = z, \quad (2.30)$$

můžeme integrovaný zisk G zapsat

$$G = \frac{P_L}{P_0} = \frac{P_{sat}}{P_0} W\left(\frac{P_0}{P_{sat}} \exp(g_0 L + \frac{P_0}{P_{sat}})\right) \quad (2.31)$$

[7].

2.4 Optické detektory

Dopadem optického signálu na detektor a jeho přeměnou na elektrický signál končí optická vrstva. K detekci dochází po demultiplexování signálu WDM na jednotlivé elektrické signály. Co se týče detektorů - přijímačů optického záření, mezi WDM a jednokanálovými optickými systémy je pouze ten rozdíl, že signál, vystupující z demultiplexoru WDM, mívá díky plně optickým zesilovačům nižší poměr signál/šum (OSNR - Optical Signal to Noise Ratio). Používají se obvykle dva typy detektorů: fotodiody PIN a lavinové fotodiody APD (Avalanche PhotoDiode). Vzhledem k tomu, že šířka zakázaného pásu je u křemíku větší než energie fotonu v oblasti třetího přenosového okna, nejsou křemíkové fotodiody použitelné. Užívají se germaniové fotodiody PIN a fotodiody PIN na bázi InGaAs, které jsou výhodnější, protože mají větší tepelnou stabilitu a nižší hodnotu temného proudu. Jejich citlivost je přibližně $1A/W$, kvantová účinnost v rozmezí od 0,5 do 0,9 a časová

odezva desítky pikosekund, čemuž odpovídá šířka pásma až 60 GHz. Některé detektory tohoto typu jsou zhotovovány ve formě vlnovodných struktur. rychlejší jsou fotodiody s Schottkyho bariérou s časovými odezvami v oblasti pikosekund, kterým odpovídají šířky pásma přibližně 100 GHz [9].

2.5 Varianty WDM-PON

Systém vlnového dělení WDM umožňuje paralelně přenášet po jednom optickém vlákne několik navzájem oddělených vlnových délek a tím znásobit jeho celkovou kapacitu. Technologie WDM byla teoreticky navržena již v roce 1970, v roce 1978 pak proběhl první přenos se současným využitím dvou vlnových délek v laboratorních podmínkách. Postupně došlo díky standardizaci ITU-T (ITU-T G.694.2) k jednotnému určení vlnových délek pro realizaci vlnového dělení a došlo také k rozdělení na variantu širokého WWDM, hrubého CWDM a hustého DWDM podle vzájemného odstupu vlnových délek [5] [8].

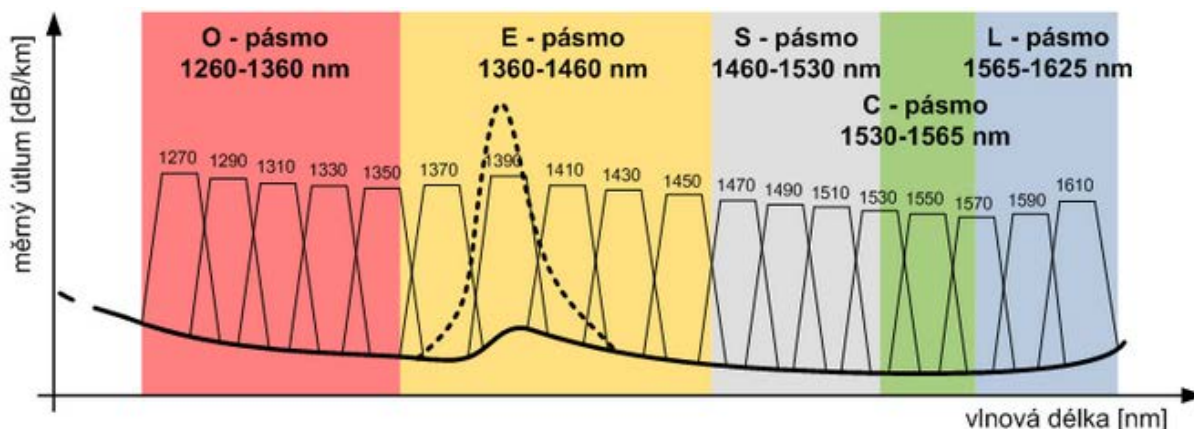
2.5.1 WWDM

Patří technologicky k nejstarším a taky nejjednodušším. Dnes je používán jen velmi zřídka a hlavně z důvodu nízkých nákladů. WWDM nejčastěji využívá čtyři vlnové délky z oblasti 1310 nm a odstup mezi jednotlivými kanály je větší než 20 nm [5] [8].

2.5.2 CWDM

CWDM vznikl jako levnější varianta DWDM. Pro hrubé vlnové dělení CWDM byly definovány jednotlivé kanály s první nosnou 1270 nm a poslední 1610 nm, s odstupem mezi jednotlivými nosnými 20 nm a tolerancí nosné $\pm 6,5$ nm. Větší rozteč kanálů a dodatečná tolerance je nutná z důvodu použití obecně méně kvalitních optických zdrojů v optických přístupových sítích a závislosti vysílané vlnové délky na teplotě zdroje. Největší výhodou je že lze technologie CWDM a DWDM mezi sebou kombinovat a vytvářet topologie s velkými možnostmi šířky pásma. Maximální dosah technologie CWDM je 80 km při přenosové rychlosti 1 Gbit/s pro každý kanál. Pro standardní jednovidové vlákno 9/125 μm je definováno 18 kanálů rozdělených do následujících pásem [5], [8]:

- pásmo O (Original): vlnové délky 1260-1360 nm, nosné číslo 1-5
- pásmo E (Extended): vlnové délky 1360-1460 nm, nosné číslo 6-10 (počítá se s optickým vlákem s potlačenými ionty OH-, v obrázku naznačeno čárkovaně)
- pásmo S (Short): vlnové délky 1460-1530 nm, nosné číslo 11-14
- pásmo C (Conventional): vlnové délky 1530-1565 nm, nosná číslo 15
- pásmo L (Long): vlnové délky 1565-1625 nm, nosné číslo 16-18



Obr. 2.12: Kanály CWDM definované dle ITU-T G694.2 [8]

2.5.3 DWDM

Varianta DWDM patří mezi nejdokonalejší optoelektronické systémy. Využívá menší odstupy mezi jednotlivými kanály a potřebuje podstatně nižší toleranci vlnové délky jednotlivých nosných. Pro odpovídající kvalitu přenosu platí, že odchylka vlnové délky nesmí být větší než 0,2 odstupu nosných, což odpovídá toleranci $\pm 0,16$ nm. Tím pádem dovoluje ve stejném pásmu umístit větší počet vlnových délek, typicky 32, 64 a perspektivně až 96 v jednom uvažovaném pásmu při rychlosti 2,5 až 10 Gbit/s. Pro použití hustého vlnového multiplexu jsou však nutné aktivně chlazené optické zdroje (nejčastěji lasery typu DFB) a celkové náklady na provoz jsou tak mnohem vyšší než v případě CWDM. Pro využití v pasivních optických přístupových sítích se pro použití vlnového dělení DWDM uvažuje o pásmech C a L s roztečí jednotlivých nosných cca 0,8 nm, což by umožnilo přenos 32 až 80 vlnových délek. Pro dálkové a páteřní optické spoje pak pásma C, L a S s roztečí nosných cca 0,4 nm a použitím 80 až 160 nosných v jednom vlákně. Existují ale již teoretické studie pro zavedení ultra jemného vlnového dělení UDWDM, který by měl odstup kanálu pouze 0,1 nm. DWDM je technologie první vrstvy, je nezávislá na přenášeném protokolu a může tak multiplexovat od pomalých protokolů až po vysokorychlostní, například 10 Gbit Ethernet [5] [8].

2.6 Typy WDM-PON

Pasivní síť založená na klasickém časovém dělení už dosáhla své maximální hranice, proto je aktuální generace optických přístupových sítí založena na principu vlnových multiplexů, někdy i kombinovaných s časovým dělením (s využitím pasivních odbočnic). Z hlediska fyzické topologie je síť WDM-PON, jak plyne z názvu, sítí pasivní, jelikož využívá pasivní AWG odbočnice. Z hlediska logické topologie však představuje aktivní topologii bod – bod, protože každý koncový uživatel má svůj vyhrazený přenosový kanál a nemusí se o

šířku přenosového pásma dělit s jinými uživateli, jak je tomu v klasické síti PON [5].

2.6.1 Možné realizace WDM-PON

První varianta uvažuje o pevně přidělených vlnových délkách všem koncovým jednotkám. To znamená, že v síti se použije klasický splitter a v sestupném směru se bude šířit signál i k ostatním koncovým uživatelům. Optické síťové zakončení obsahuje pevně nastavený filtr, který oddělí pouze svou určenou nosnou vlnovou délku a ostatní bude ignorovat. Ve vzestupném směru bude mít každá ONT jednotka svoji individuální vysílací vlnovou délku, na které bude vysílat. Z hlediska logické topologie se jedná o síť typu bod-bod. Jednotky ONT bývají naladěné ještě na jednu společnou vlnovou délku, která slouží pro šíření broadcastu. Nevýhody této realizace jsou obdobné jako u klasické PON sítě, v sestupném směru je nutné zabránit odposlechu různými šifrovacími metodami. Pevné přiřazení vlnových délek dělá síť nepružnou ke změnám a s přenosovými kapacitami je nakládáno neekonomicky. Další nevýhodou je, že v síti nemůžou být dvě jednotky komunikující na stejné vlnové délce.

Druhá varianta využívá namísto běžných splitterů směrové odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating). Rozdíl oproti předchozí variantě je zřejmý, v sestupném směru je přicházející signál pomocí AWG vydělen na jednotlivé vlnové délky, jejichž nosné se k určeným jednotkám ONT šíří v separátních kanálech. Ve vzestupném směru je princip stejný jako u první varianty. Každá jednotka ONT vysílá datové toky na jí vyhrazené vlnové délce. Výhodou této varianty je zejména menší vložný útlum AWG odbočnice oproti běžným splitterům, tato hodnota se pohybuje kolem 5 dB nezávisle na počtu vlnových délek. Další výhoda plyne z odstranění filtrů v jednotkách ONT, což znamená také snížení celkového útlumu. V případě této varianty jsou v jednotkách použity DFB lasery.

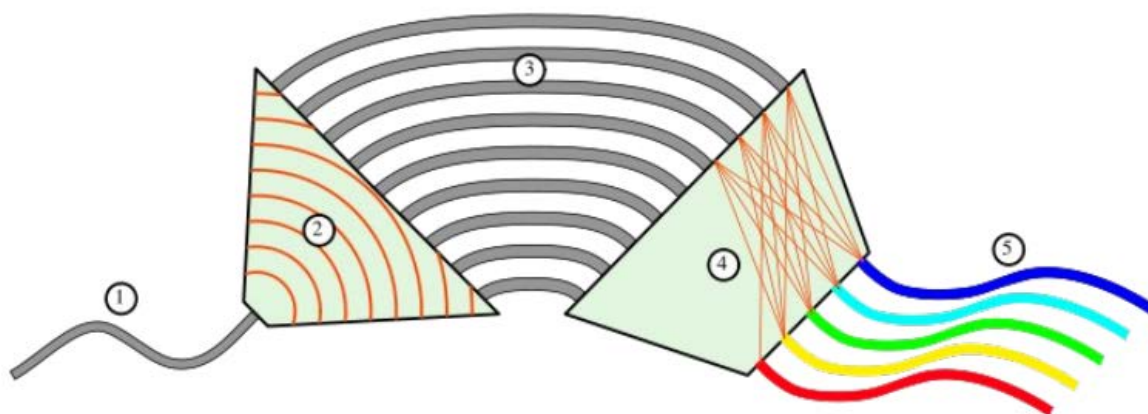
Třetí možnost realizace WDM-PON je založena na principu kombinace AWG a klasických splitterů, případně kaskádního řazení. Tato kombinace potom využívá vydělování optických signálů na základě vlnových délek (v AWG) v kombinaci pasového dělení (time slotů ve splitterech) představuje tak maximální využití přenosového pásma. Celá tato topologie vede k univerzálnímu síťovému plánu optických kanálů. Použití univerzálních jednotek ONT a volitelných vlnových délek navíc také umožňuje přidělování kanálů k jednotkám na základě aktuální potřeby a požadavků. Tento mechanismus se označuje jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment).

Čtvrtá možnost realizace WDM PON je založena opět na principu AWG odbočnic, rozdíl je však v použitých jednotkách ONT. Využívá se v nich FP laseru opticky zavěšeného na stimulační vlnové délce přicházející od AWG. Příchozí světelný paprsek prochází filtrem, kde se pro příchozí směr oddělí signál a pokračuje dále do přijímací části ONT. Jiná část světelného paprsku prochází přes filtr dále na FP laser. Zavěšením FP laseru na stimulační vlnovou délku dojde ke změně spektra FP laseru, které bylo původně tvořeno periodickými vlnami, na spektrum s úzkou spektrální čarou, díky čemuž je možné FP laser použít jako vysílač u WDM-PON systému [5] [8].

3 POPIŠTE KONSTRUKCI A VLASTNOSTI OPTICKÉHO MULTIPLEXORU AWG

3.1 Konstrukce AWG

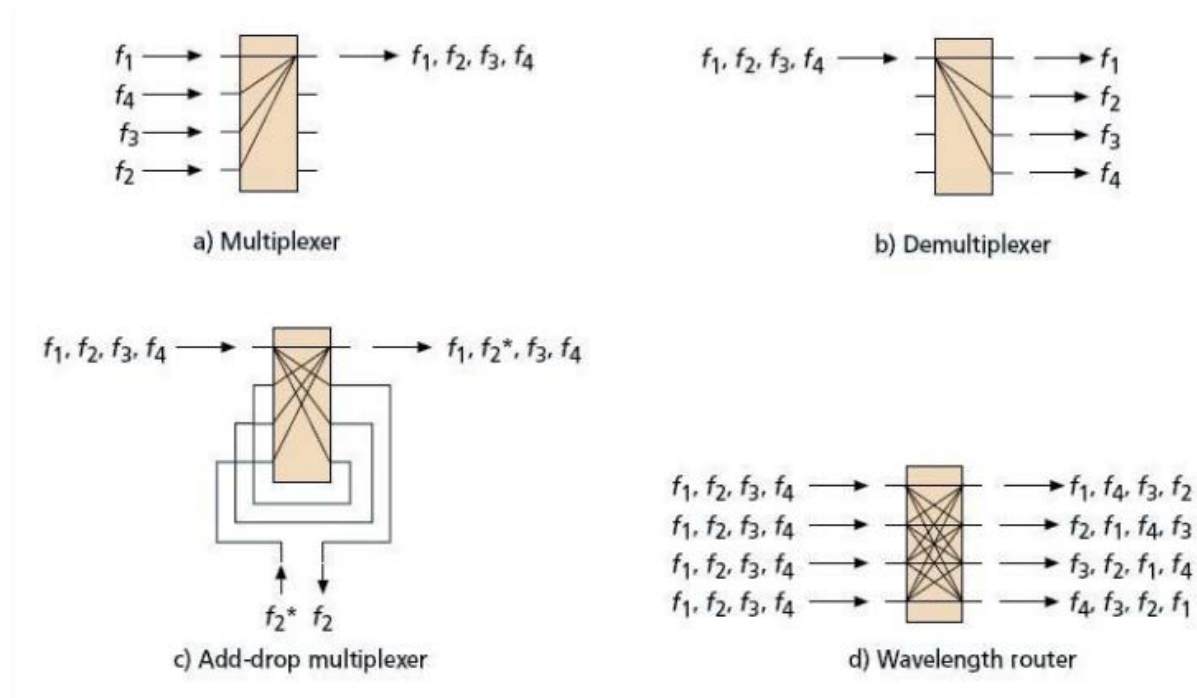
Rozšíření použití AWG (Arrayed Waveguide Grating) je značné. Tuto popularitu si vysloužilo zejména tím, že AWG zařízení dokáže multiplexovat a demultiplexovat velké množství optických signálů, každý na jiné vlnové délce, s velkou přesností a s relativně nízkými ztrátami. Své využití našlo zejména v DWDM optických systémech. AWG je zobrazena na obrázku obr. 3.1. Skládá se ze vstupního signálu (1), který obsahuje všechny vlnové délky, seřazených vlnovodů (3), výstupního signálu (5) a dvou spojovacích součástek (2), (4). Tyto součástky se označují jako FPR (Free Propagation Region), což by se dalo přeložit jak volné šíření prostorem [10].



Obr. 3.1: AWG [10]

Vstupující signál (1) přivádí na vstupní spojku FPR (2) různé signály, které jsou distribuovány mezi pole vlnovodů. Světlo je následně šířeno přes vlnovody do výstupní spojovací součástky FPR (4). Délky vlnovodů jsou určeny tak, že rozdíl délek optických tras sousedních vlnovodů se rovná vícenásobné celočíselné hodnotě střední vlnové délky demultiplexoru. Pro tuto vlnovou délku platí, že bude přivedena na vstup výstupní spojovací součástky (4) bez změny fáze. Prostorové šíření na výstupu vstupní spojovací součástky (2) bude generované na vstupu výstupní spojovací součástky (4). Daní za konstantní rozdíl délek sousedních vlnovodů je lineární zvětšování se fázového posunu. Změna fázového posunu roste zevnitř směrem ven. To způsobí, že přední část vlnovodu bude sklopena na výstup otvoru, a proto ohniště plošného obrazu není ve středu, ale je posunuté mimo. Nastavení umístění výstupních vlnovodů (nazývaných také výstupními kanály) v plošném obraze výstupní spojovací součástky (4) nám umožňuje prostorové oddělení jednotlivých vlnových délek. Díky tomu, že AWG je vyrobena na bázi standardizovaných

fotolitografických technikách, integrování AWG nabízí řadu výhod. Mezi nejvýhodnější patří spolehlivost součástek. Nesmíme však zapomenout ani na kompaktnost, zmenšování součástek a velkou toleranci samotného zařízení (není potřeba vertikální hloubkové leptání). Nicméně základními výhodami AWG je precizní kontrolované rozmístění kanálů, snadná a přesná stabilizace vlnových délek, nízké a jednotné ztráty, polarizace necitlivosti a vysoká stabilita. AWG je pasivní vlnově délkové selektivní zařízení. Na obrázku 3.2 jsou znázorněny čtyři možnosti jeho využití [10].

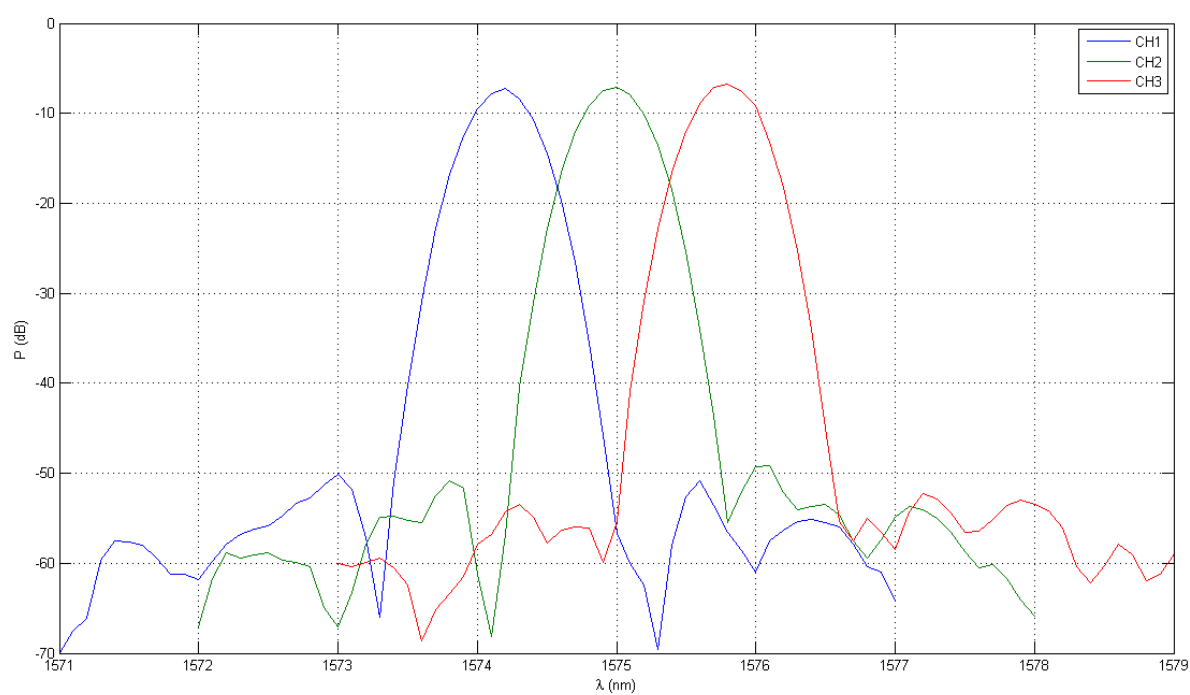


Obr. 3.2: Možnosti využití AWG [10]

Z obrázku 3.2 je možné vysledovat, že daná $N \times N$ AWG, v tom to případě $N = 4$, poskytuje pro DWDM optický systém čtyři funkční zapojení: multiplexor, demultiplexor, add-drop multiplexor (OADM) a vlnově délkový směrovač (OWR) [10].

3.2 Přeslechy

Jelikož se jednotlivé komunikační kanály v systému WDM-PON překrývají, vznikají na optickém multiplexoru AWG přeslechy. To znamená, že když komunikuje OLT s první ONU na kanálu jedna, tak tuto komunikaci najdeme i v kanálu dvě, ale výrazně utlumenou. Přesné rozložení prvních tří kanálů v L pásmu je změřeno, aby bylo možné přesně stanovit, jak tyto přeslechy budou mít vysokou úroveň. Z obrázku 3.3 lze vidět, že přeslech vedlejšího kanálu by mohl být utlumen přibližně o 15 - 20 dB oproti normálnímu komunikačnímu signálu.



Obr. 3.3: Rozložení prvních tří kanálů v L pásmu

4 PŘÍPRAVA K MĚŘENÍ

Před realizováním prováděného měření bylo třeba provést celou řadu úkonů, které jsou v této kapitole popsány.

4.1 Použité přístroje a součástky

V první řadě bylo třeba určit vhodné měřicí přístroje a součástky, které budou k měření potřeba. K měření spektra se použily dva spektrometry od firmy EXFO, konkrétně EXFO FTB-5240BP a EXFO FTB-5240B. Pro zesílení přeslechů bylo využito polovodičových zesilovačů a také vláknový zesilovač. Z polovodičových zesilovačů byly použity typy SOA1117P a BOA1080S, jejichž specifikace je v tabulce 4.1 a 4.2. Vláknový zesilovač byl použit EDFA CLA PB01F a jeho specifikace je v tabulce 4.3.

Tab. 4.1: Specifikace zesilovače SOA1117P [14]

Vlastnost	Symbol	Hodnota
Provozní proud	I_{OP}	500 mA
Provozní vlnová délka	-	1528 – 1562 nm
Centrální vlnová délka	λ_C	1550 nm
Saturační výstupní výkon(-3dB)	P_{SAT}	9 dBm
Zisk slabého signálu (V C pásmu $P_{in} = -20\text{dBm}$)	G	20 dB
Odchylka zisku	δG	0,2 dB
Šumové číslo	NF	10 dB
Dopředné napětí	V_F	1,4 V
Délka čipu	–	1 mm
Index lomu vlnovodu	–	3,2

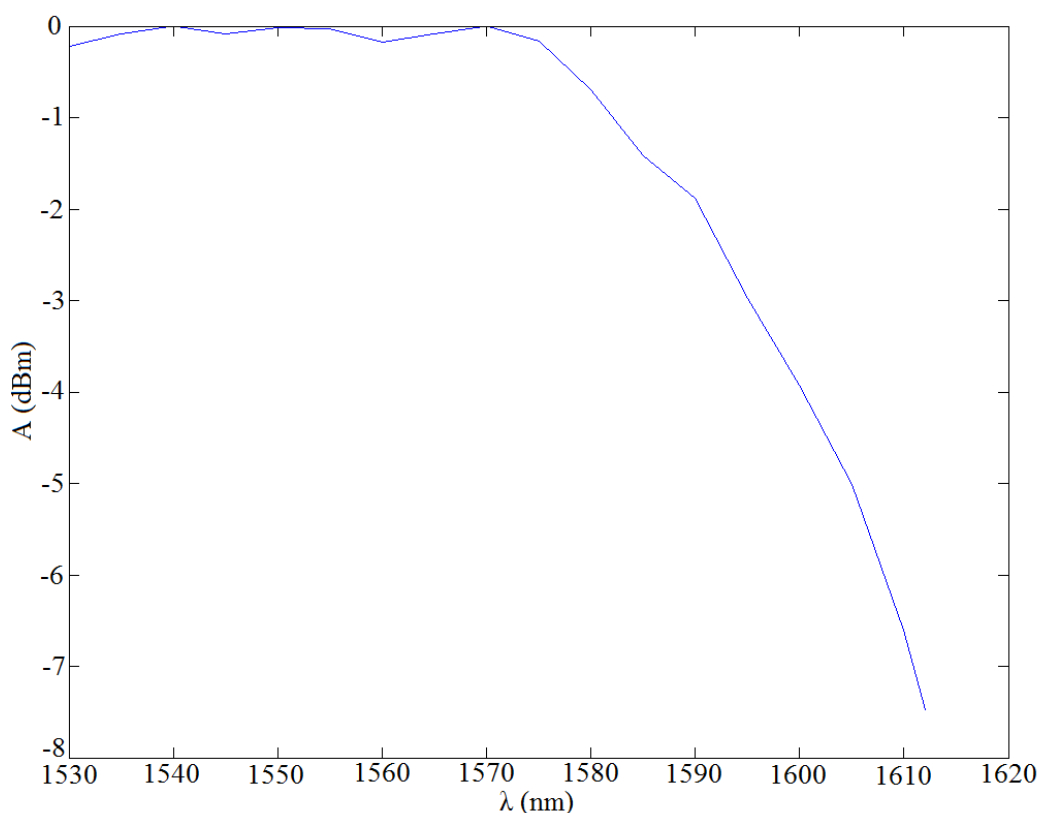
Tab. 4.2: Specifikace zesilovače BOA1080S [13]

Vlastnost	Symbol	Hodnota
Provozní proud	I_{OP}	600 mA
Provozní vlnová délka	-	1570 – 1610 nm
Centrální vlnová délka	λ_C	1590 nm
Saturační výstupní výkon(-3dB)	P_{SAT}	15 dBm
Zisk slabého signálu (V C pásmu $P_{in} = -20\text{dBm}$)	G	26 dB
Odchylka zisku	δG	0,05 dB
Šumové číslo	NF	7 dB
Dopředné napětí	V_F	1,5 V
Délka čipu	–	1,5 mm
Index lomu vlnovodu	–	3,2

Tab. 4.3: Specifikace zesilovače EDFA CLA PB01F [6]

Vlastnost	Symbol	Hodnota
Provozní vlnová délka	-	1535 – 1565 nm
Saturační výstupní výkon(-3dB)	P_{SAT}	> 20 dBm
Vstupní optický výkon	G	-5 – 5 dBm
Nominální zisk	-	20 dB
Šumové číslo	NF	< 6 dB

Jak lze vidět z tabulky 4.3 tak zesilovač EDFA má provozní vlnovou délku pouze v C pásmu, což je pro praktické měření nevyhovující, proto se měřením ověřilo, jaký je rozdíl mezi zesílením v C a na začátku L pásma. Měření se provádělo pomocí laditelného laseru a spektrometru. Výsledný graf je na obrázku 4.1. Z grafu je krásně vidět, že EDFA zasahuje poměrně daleko do L pásma. Pro měření, které se pohybuje okolo vlnové délky 1575 nm EDFA vykazuje jen nepatrný pokles zesílení oproti C pásmu, což je velmi pozitivní zjištění.

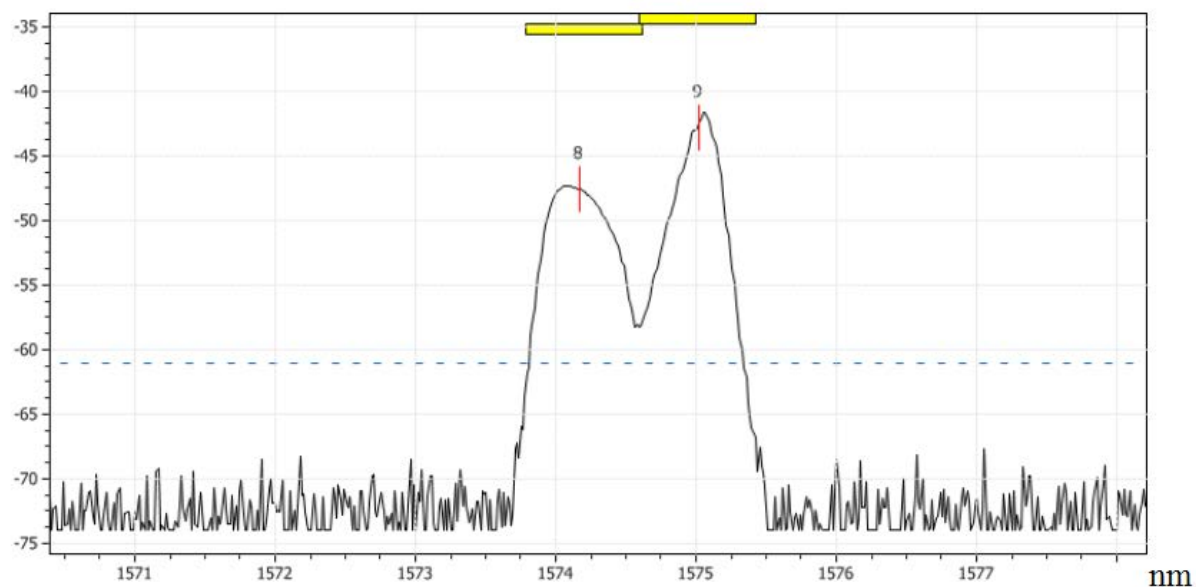


Obr. 4.1: Rozsah zesílení zesilovače EDFA

Také bylo potřeba prakticky ověřit jak se na dané vlnové délce budou chovat oba polovodičové zesilovače a obzvláště pak SOA1117P jelikož je určen pro zesilování v C

pásmu. Výsledné grafy jsou na obrázcích 4.2 až 4.4.

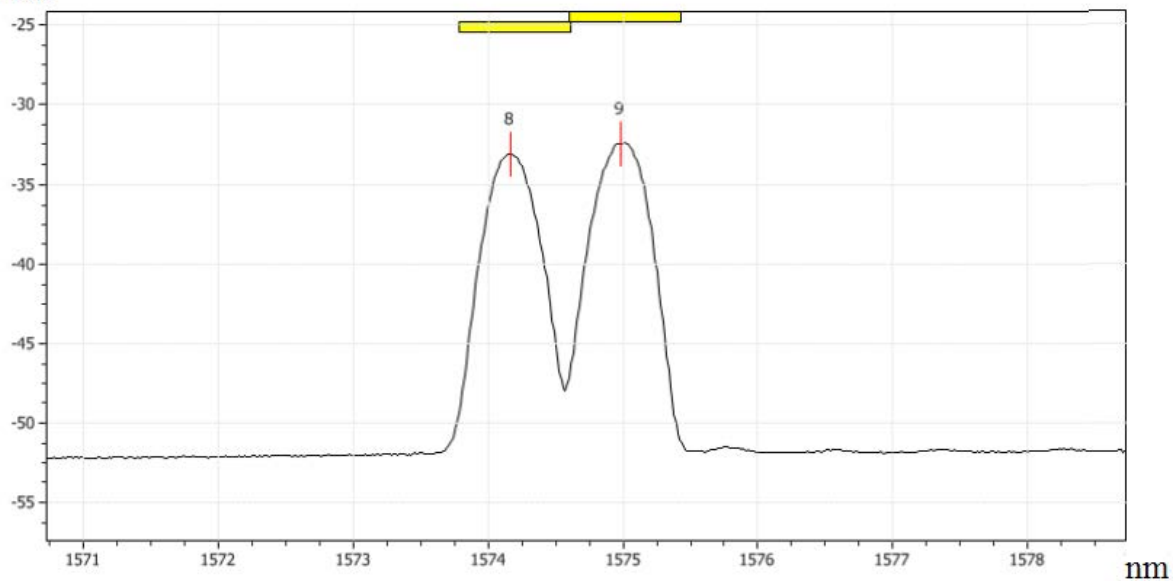
dBm



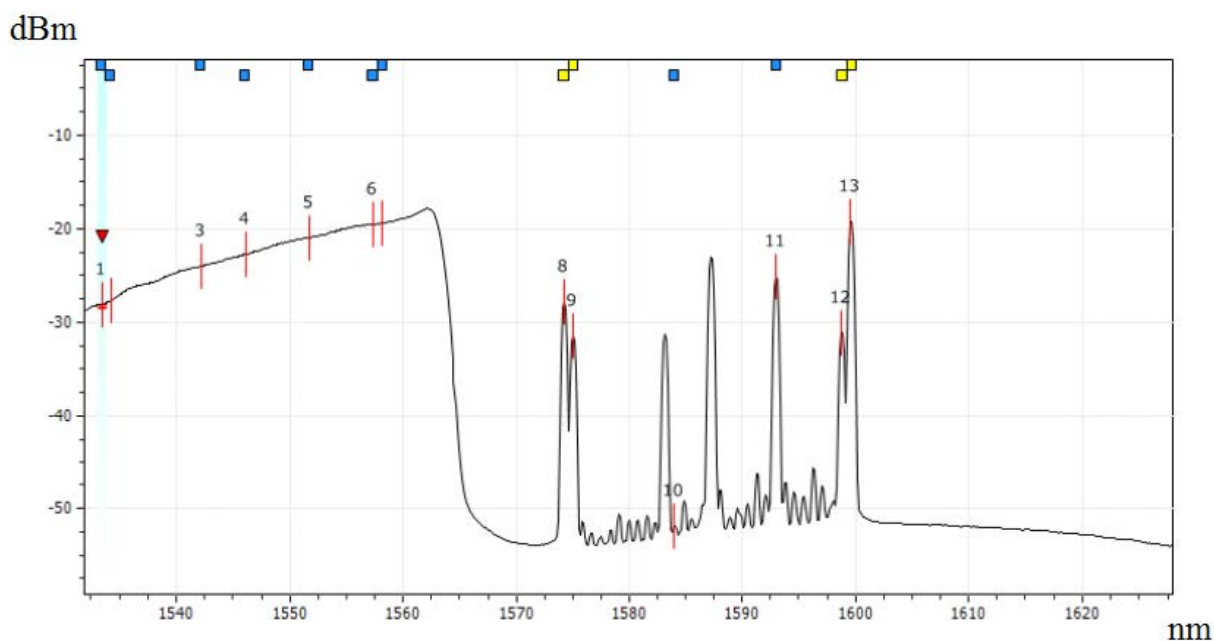
Obr. 4.2: Signál bez zesílení

Z grafu je patrné, že polovodičový zesilovač BOA1080S, při maximálním zesílení, zesílil 1. kanál L pásma téměř o 20 dB a zesilovač SOA1117P zesílil tentýž signál o 15 dB. Když už jsou proměřena zesílení všech používaných zesilovačů, tak už jen zbývá zjistit

dBm



Obr. 4.3: Signál po zesílení SOA1117P



Obr. 4.4: Signál po zesílení BOA1080S

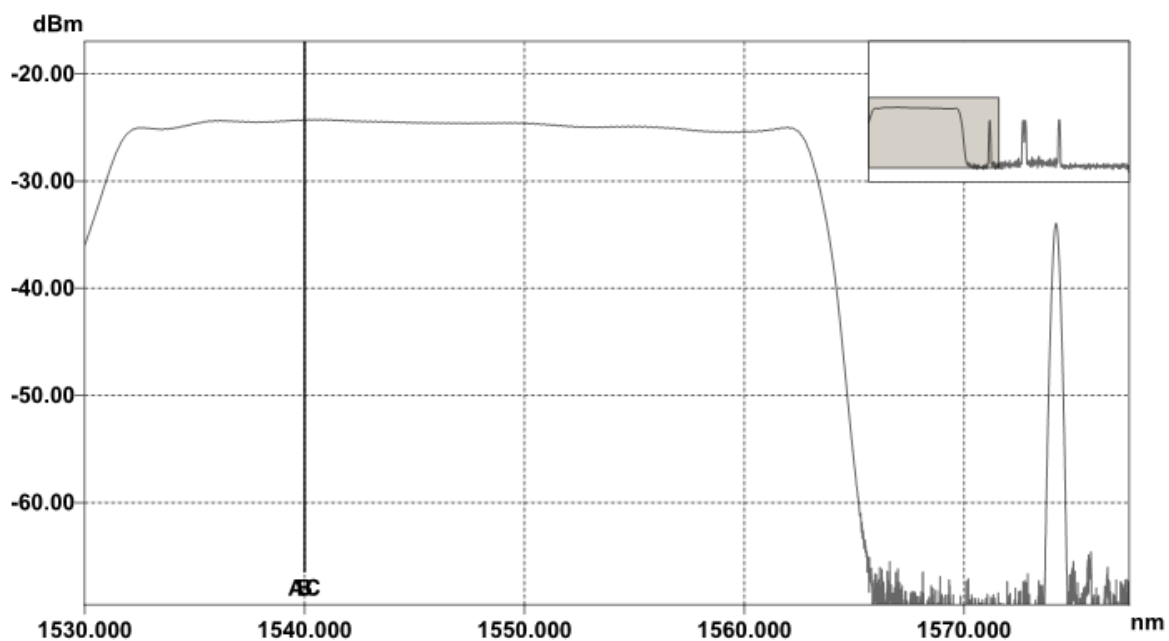
vysílací výkony jednotlivých prvků v síti jako je OLT, ONU a AWG. Také se změřil útlum propojení mezi racky, v kterých jsou uloženy jednotlivé prvky v síti. Útlum byl měřen metodou 1C a hodnota vyšla 0,35 dB, což je velmi nízká hodnota, které do měření žádnou výraznou chybu nezanese.

Na obrázcích 4.5 a 4.6 jsou signály vysílané OLT. Na obrázku 4.5 je signál zabírající celé C pásmo a slouží k nalazení jednotlivých FP laserů v ONU. Úroveň tohoto signálu je -25 dBm. Na obrázku 4.6 jsou jednotlivé komunikační signály v L pásmu, které po projití AWG vedou k jednotlivým ONU. Tyto signály mají úroveň ještě o 10 dB nižší než ty v C pásmu, čili -35 dBm. Měření bylo prováděno při aktivních 4 jednotkách.

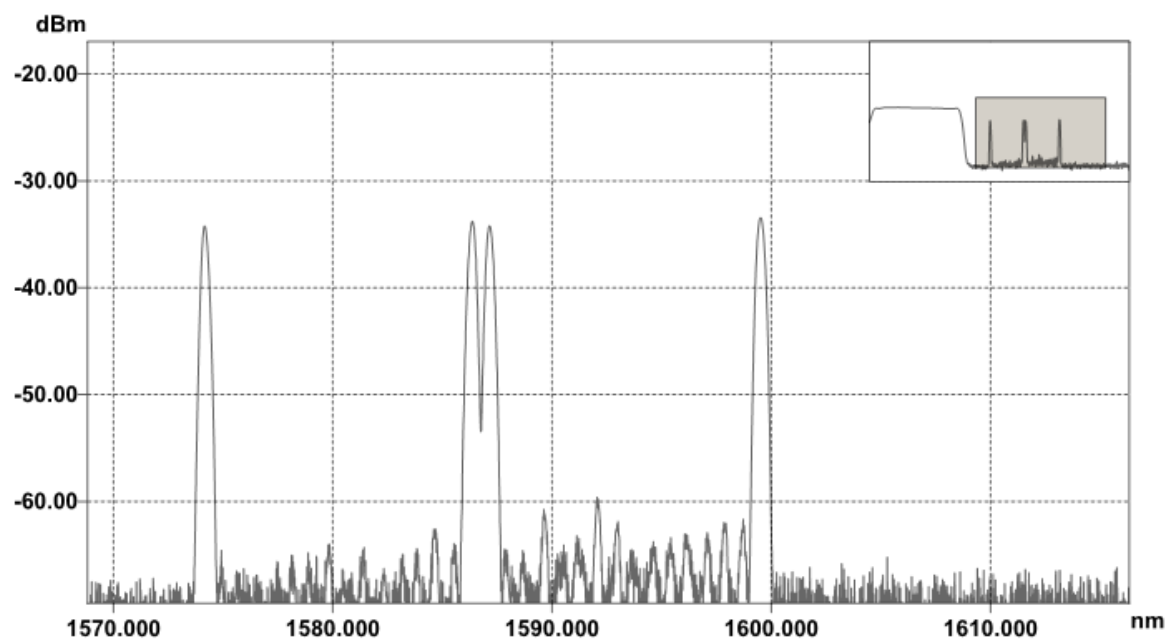
Zde jsou ty stejné signály po projití AWG, ale pouze 1. kanál. Na obrázcích 4.7 a 4.8 lze vidět, že úroveň signálu jak u C, tak i u L pásma je snížena o 4 dB, což způsobuje samotné AWG svým vnitřním útlumem.

Na obrázku 4.9 už je zobrazen zpětný signál, čili ten co posílá ONU směrem k OLT. Úroveň signálu je -32 dBm, což je téměř shodná vysílací úroveň jako u OLT.

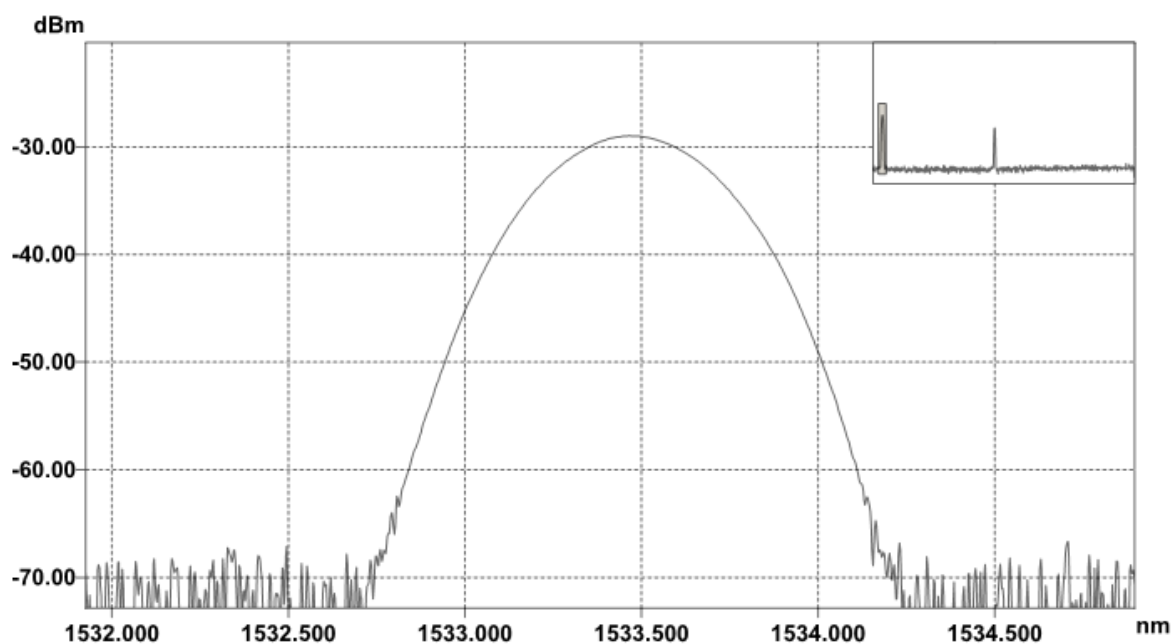
Obrázek 4.10 už zobrazuje zpětný směr za AWG, čili už opět jsou vidět všechny zpětné signály z jednotlivých ONU. Úroveň signálu je opět snížena o útlum AWG, což je cca 4 dB.



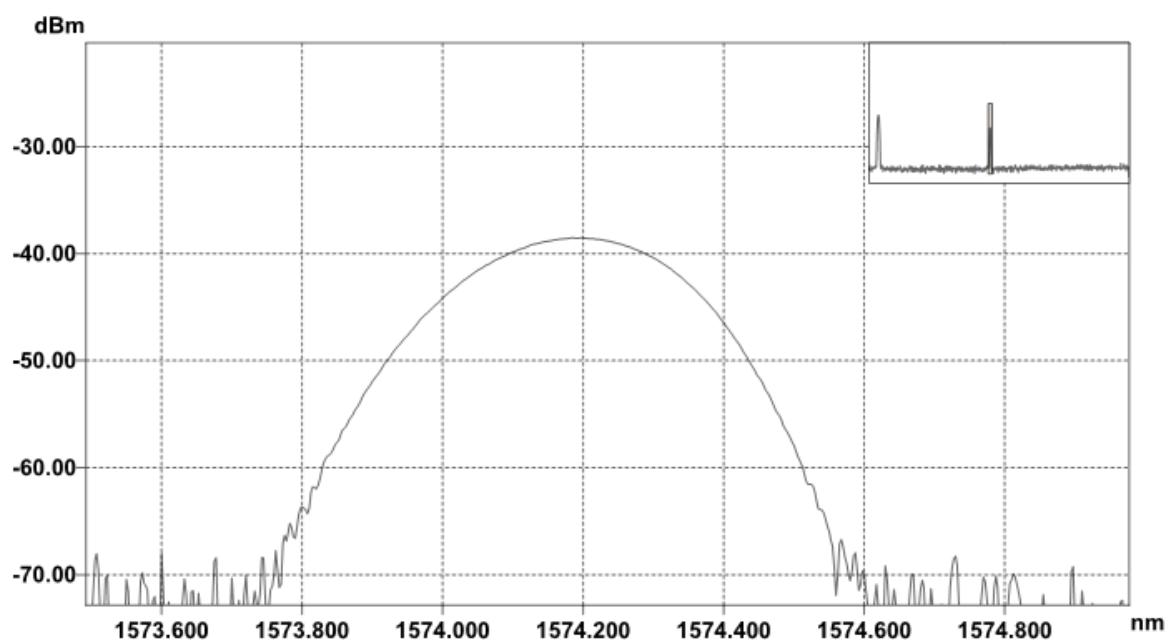
Obr. 4.5: Výstup z OLT v C pásmu



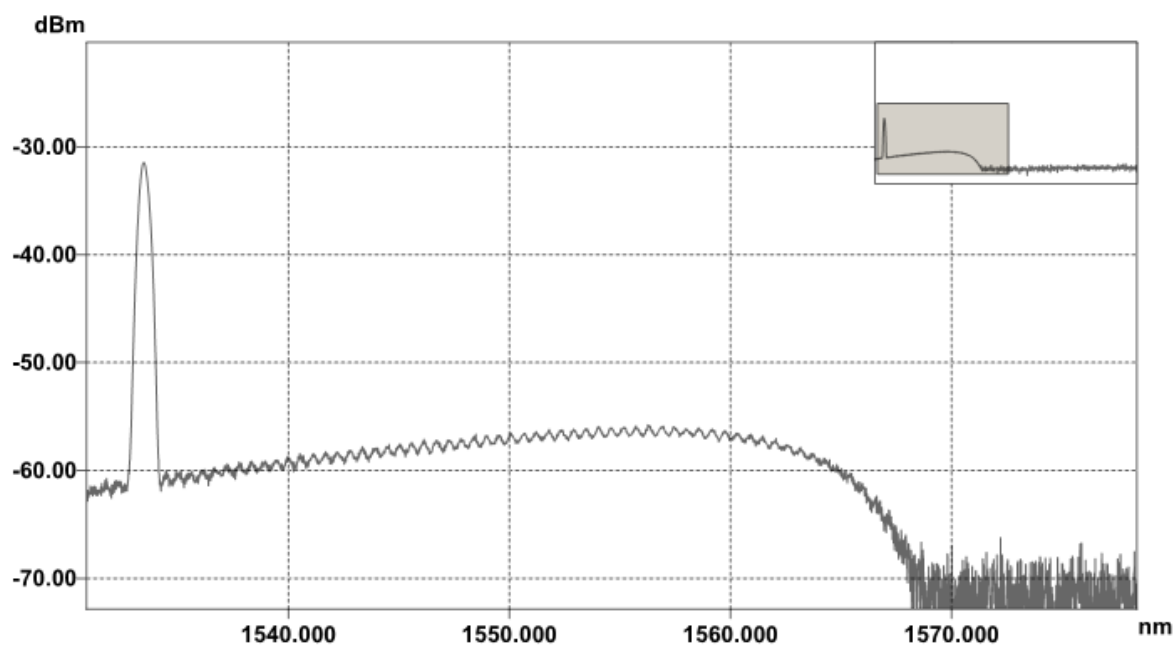
Obr. 4.6: Výstup z OLT v L pásmu



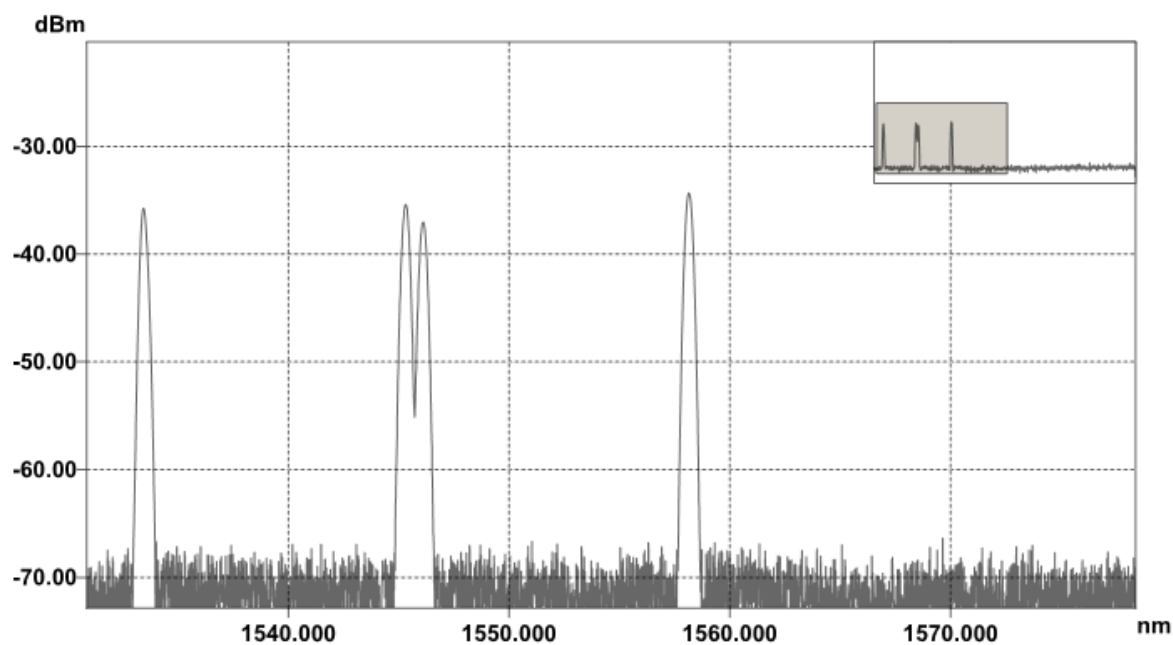
Obr. 4.7: Výstup z AWG 1. C kanál



Obr. 4.8: Výstup z AWG 1. L kanál



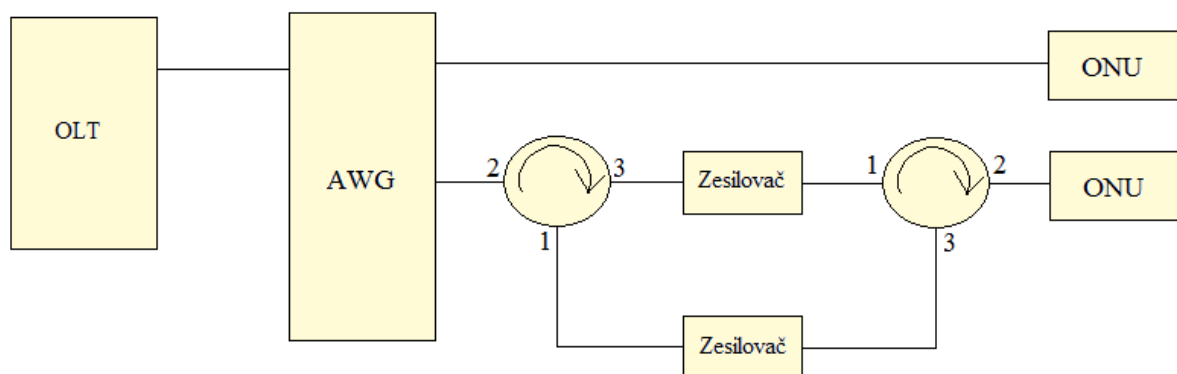
Obr. 4.9: Zpětný signál z ONU



Obr. 4.10: Výstup z AWG ve zpětném směru

5 SIMULACE A REÁLNÉ MĚŘENÍ

Pro všechny simulace byl použit program OptiSystem 14 vytvořený firmou Optiwave. Před začátkem simulace se muselo navrhnout reálné schéma měření, aby bylo jasné jak celé zapojení bude reálně vypadat (obrázek 5.1). Všechny snímky ze spektrometru ukazují nižší hodnotu o 10 dB než ve skutečnosti kvůli použitému 90/10 děliči.



Obr. 5.1: Schéma zapojení reálného měření

5.1 Zapojení s EDFA

5.1.1 Simulace

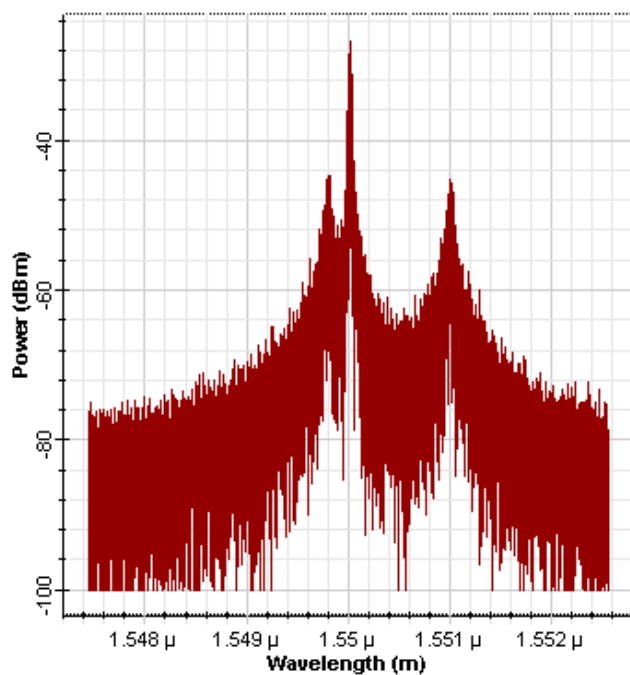
Podle výše uvedeného schématu se poté sestavovala i samotná simulace. Nejdůležitější bylo nastavit vlastnosti AWG, které byly laboratorně ověřeny, aby co nejvíce odpovídaly skutečnosti. Místo bloku OLT je dvojice FP laserů, signál z prvního laseru je ladící pro ONU, tudíž je v C pásmu a signál z druhého laseru slouží ke komunikaci a nachází se v prvním kanálu L pásma (1574,2 nm) a je zapojen do prvního kanálu v AWG. Zbytek schématu, čili zapojení cirkulátorů a zesilovačů zůstává stejné. Snímek z programu optiwave je na obrázku 5.2. Na následujících obrázcích 5.3 a 5.4 je spektrální charakteristika FP laseru.

Dva výše zmíněné signály vstupují do AWG a zde se první kanál L pásma přenesse na první výstup (obrázek 5.5) a na druhém výstupu můžeme pozorovat námi očekávaný přeslech a také ladící signál (obrázek 5.6).

Z obrázku 5.5 jde vidět, že úroveň komunikačního signálu v prvním kanálu je téměř -30 dBm, ale důležitější je úroveň tohoto signálu v druhém kanálu. Z obrázku 5.6 lze vyčíst, že úroveň přeslechu se nachází mírně nad hranicí -70 dBm, což je velmi nízká hodnota, ale proto je na trase zapojený zesilovač EDFA. U zesilovače EDFA bylo velmi důležité nastavit správně délku EDF, aby zesiloval maximálně námi požadovanou vlnovou délku.



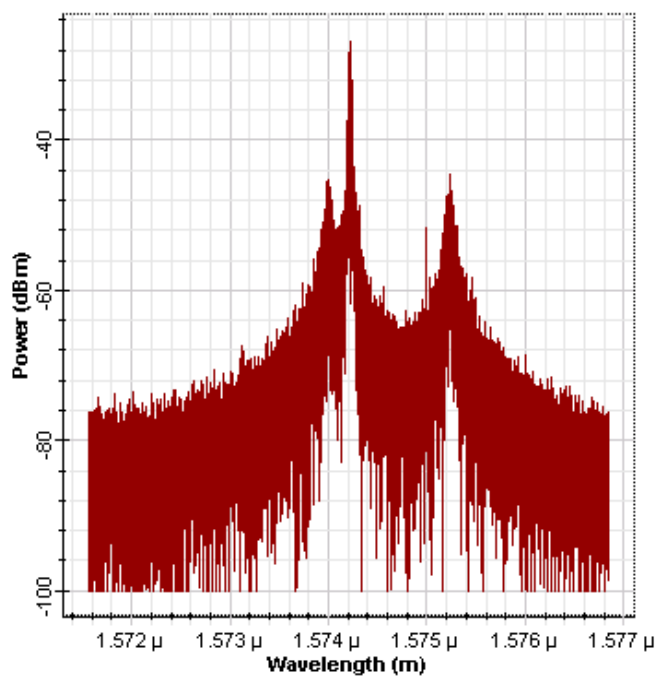
Optical Spectrum Analyzer_6



Obr. 5.3: Spektrální charakteristika FP laseru v C pásmu



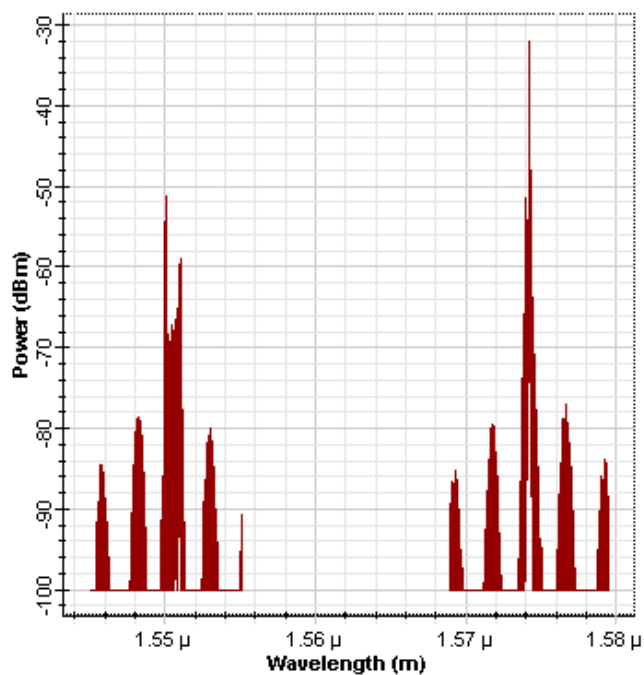
Optical Spectrum Analyzer_7



Obr. 5.4: Spektrální charakteristika FP laseru v L pásmu



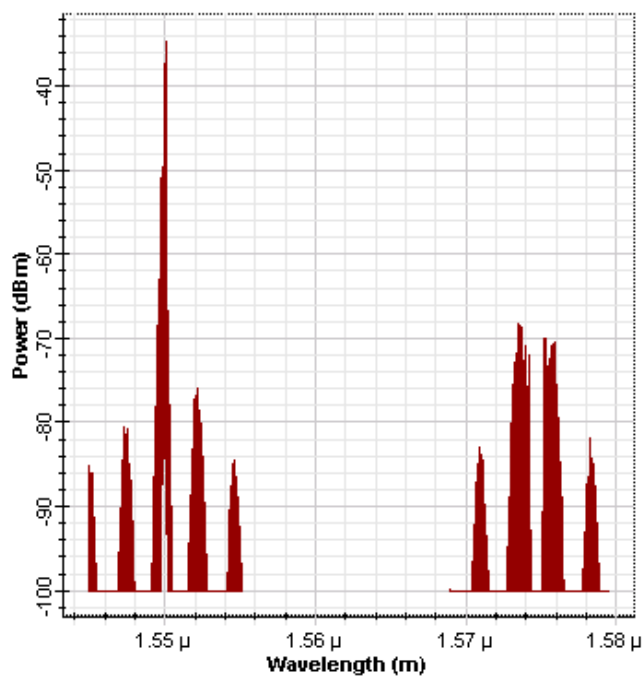
Optical Spectrum Analyzer_3



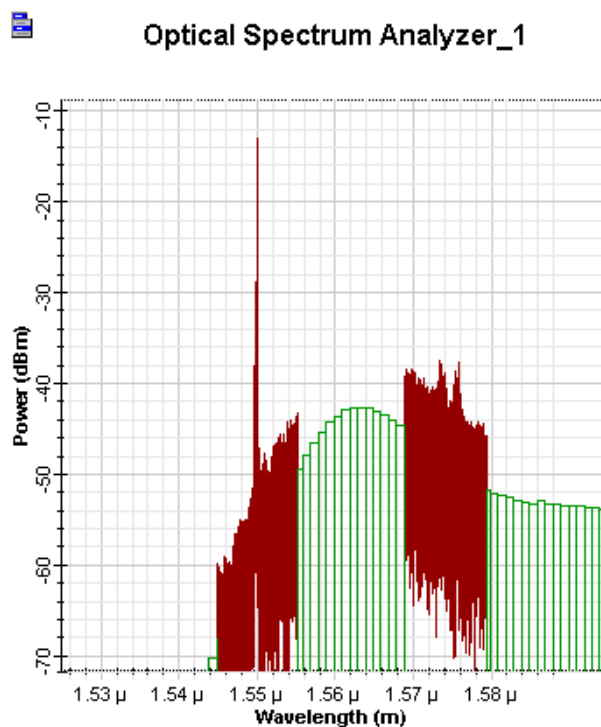
Obr. 5.5: Výstup z AWG – 1. kanál



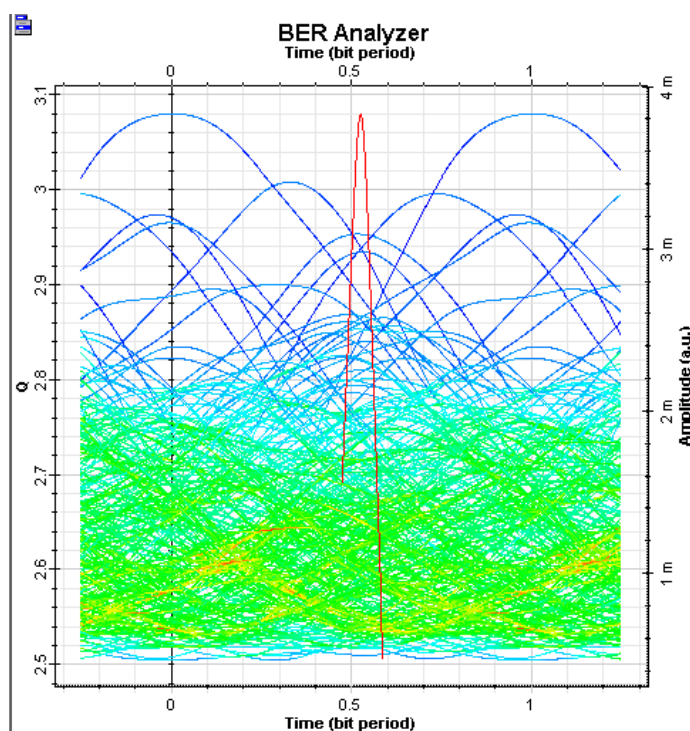
Optical Spectrum Analyzer



Obr. 5.6: Výstup z AWG – 2. Kanál



Obr. 5.7: Výstup ze zesilovače EDFA

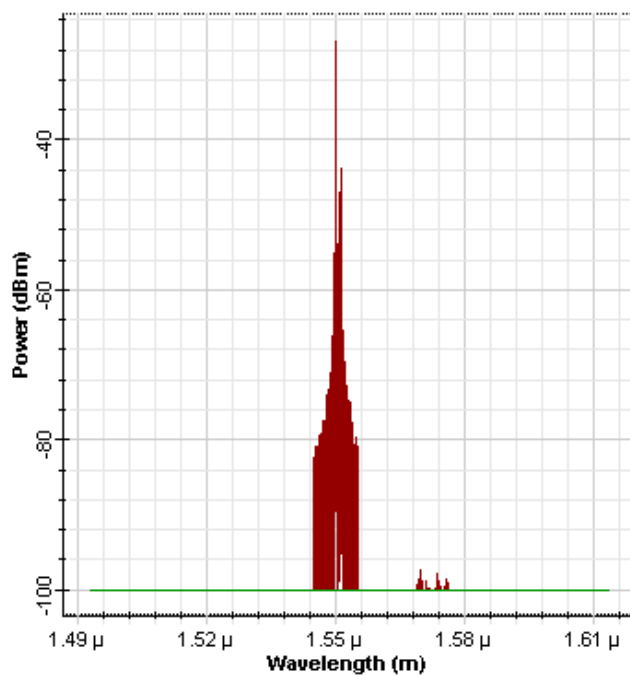


Obr. 5.8: Diagram oka za ONU

Nejlepších hodnot dosahoval při použití 25 metrového vlákna. Na obrázku 5.7 je vidět úroveň signálu po projití zesilovačem.



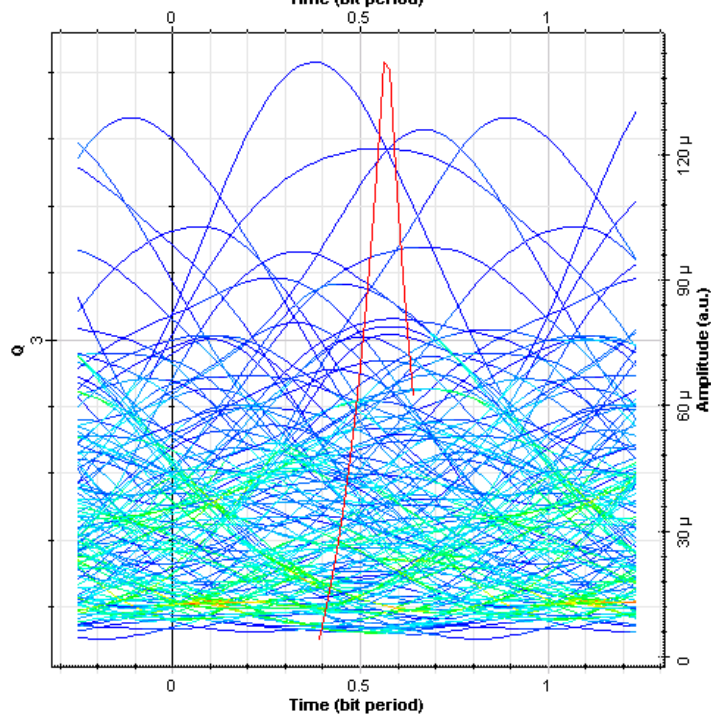
Optical Spectrum Analyzer_2



Obr. 5.9: Zpětný směr bez zesílení



BER Analyzer_1



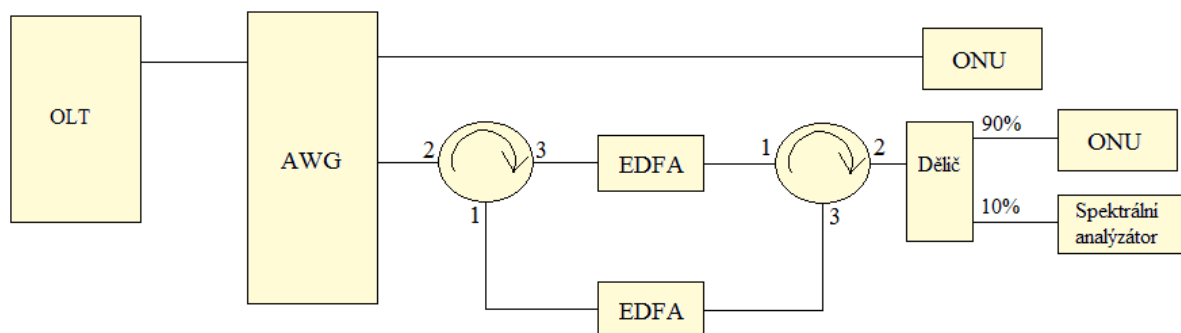
Obr. 5.10: Diagram oka ve zpětném směru

Z obrázku 5.7 lze vidět, že zesilovač zesílil signál o 30 dB na celkovou úroveň přesahující -40 dBm, což už je dostatečná úroveň pro možný přenos dat. Na obrázku 5.8 je diagram oka na úplném konci trasy v ONU. Jak lze vidět diagram oka je nečitelný a parametr BER nabývá hodnot řádově 10^{-4} , což je dost vysoká hodnota a takový přenos by byl značně chybový. Norma vyžaduje hodnoty řádově 10^{-9} a nižší, aby mohl být přenos považován za spolehlivý. Obrázek 5.9 a 5.10 zobrazuje zpětný směr od ONU.

Na obrázku 5.9 je signál, který vysílá ONU a jelikož má úroveň kolem -30 dBm, tak ani není třeba tento signál zesilovat. Obrázek 5.10 znázorňuje diagram oka ve zpětném směru a ani v tomto případě není čitelný a BER nabývá hodnot řádově 10^{-6} , což je lepší hodnota než v opačném směru, ale pořád je moc vysoká.

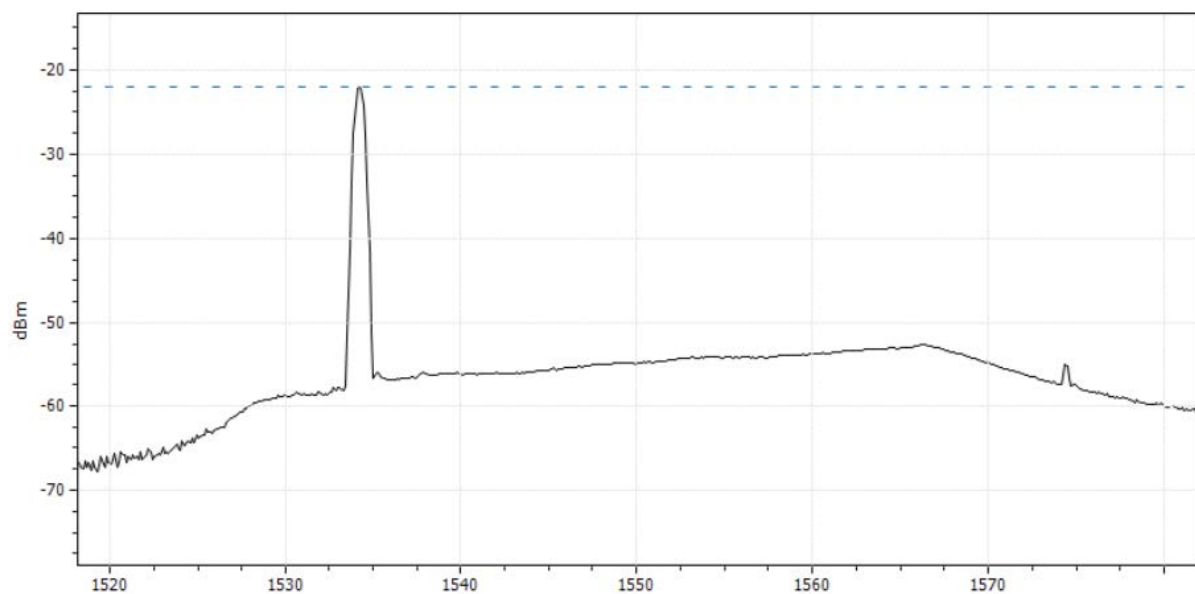
5.1.2 Reálné měření

Po simulaci přichází na řadu reálné měření stejného zapojení. Na obrázku 5.11 je zobrazeno schéma zapojení, na kterém probíhalo měření.

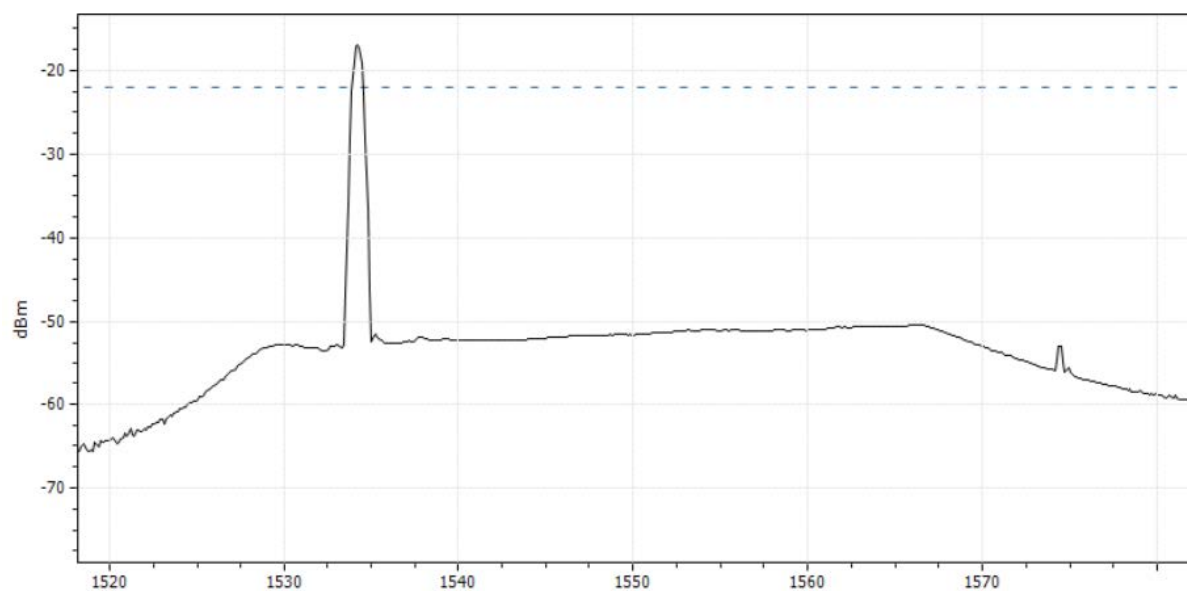


Obr. 5.11: Schéma měření se zesilovačem EDFA

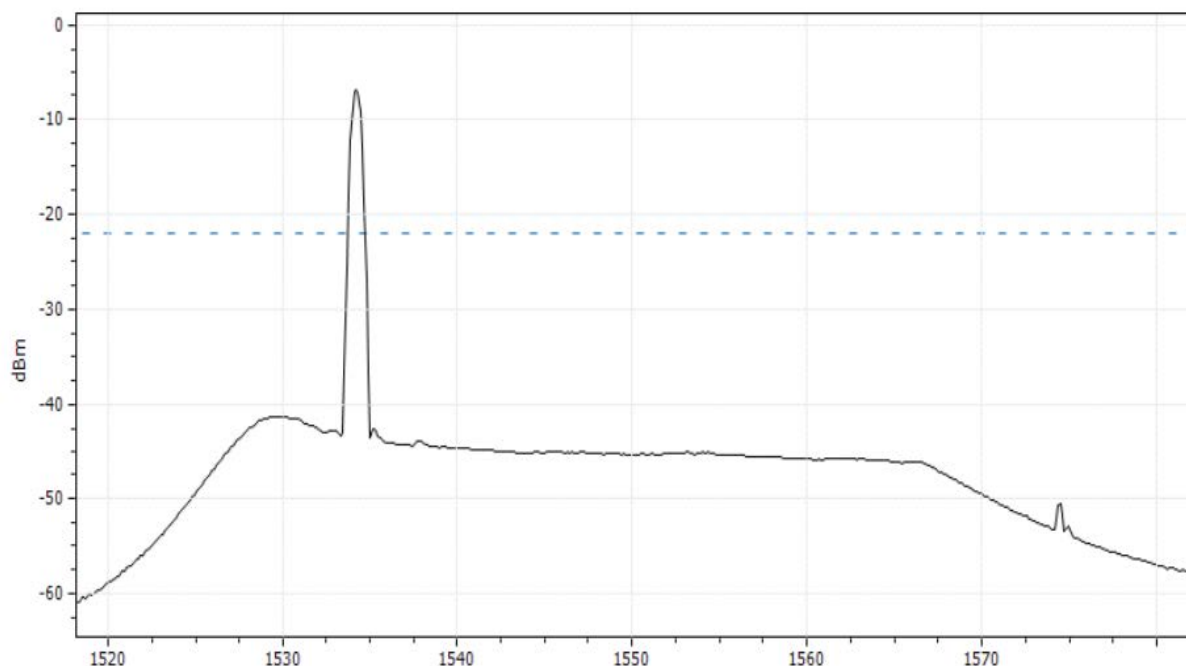
Na obrázcích 5.12, 5.13 a 5.14 je výstup se zesilovače EDFA s různým zesílením. Na obrázku 5.12 je vidět výrazný ladící signál v C pásmu, a jelikož EDFA zesiluje celé C pásmo, tak je zesílen i šum a přeslech ležící v L pásmu není tolik zesílen a tudíž má nižší úroveň, než šum v C pásmu. Při zvýšení zesílení se situace výrazně nemění, jen má celý průběh vyšší úroveň. Jelikož EDFA zesiluje celé spektrum i včetně šumu, tak pro tento účel není zesilovač EDFA vhodný. V reálném měření je hodnota v C pásmu téměř shodná jako v případě simulace a v L pásmu také. V simulaci je hodnota šumu nižší než při reálném měření.



Obr. 5.12: Výstup ze zesilovače EDFA se zesílením 10 dB



Obr. 5.13: Výstup ze zesilovače EDFA se zesílením 15 dB



Obr. 5.14: Výstup ze zesilovače EDFA se zesílením 25 dB

5.2 Zapojení se SOA

5.2.1 Simulace

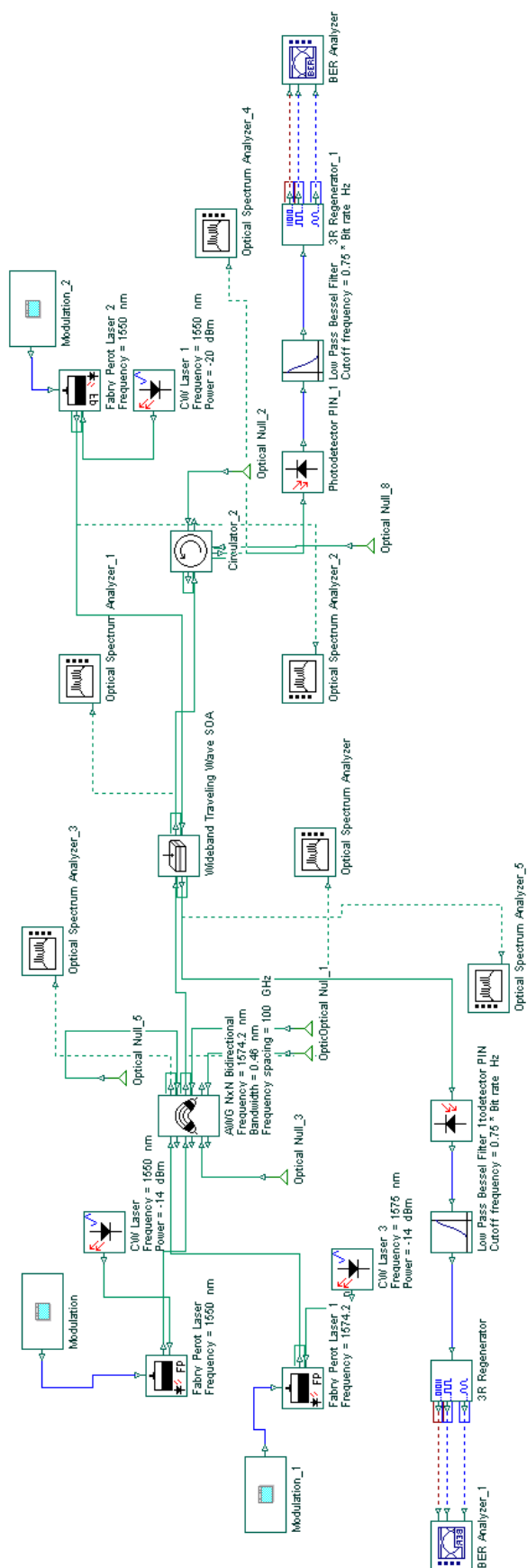
Pro zapojení s polovodičovým zesilovačem bylo možné zapojení zjednodušit, jelikož SOA zesilovač je obousměrný, čili není nutné do trasy zapojovat žádné cirkulátory. Takové zapojení je na obrázku 5.15.

První část zapojení je shodná, protože je výstup s laserů a s AWG shodný jako u první simulace, tak je zde nebudu znova přidávat (obrázky 5.3 – 5.6). Na obrázcích 5.16 a 5.17 je zobrazen výstup ze zesilovačem.

Na obrázcích 5.16 a 5.17 jsou dva výstupy ze zesilovače SOA, jeden s polovičním zesílením a druhý s maximálním zesílením. Výsledky těchto simulací se od sebe výrazně neliší, asi jen o 5 dB. Výsledná úroveň signálu je ale shodná, jako v případě kdy byl použit EDFA zesilovač.

Na obrázcích 5.18 a 5.19 jsou diagramy oka při jednotlivých zesíleních, ale jak je vidno i tyto diagramy oka jsou ztraceny v šumu a hodnoty BER jsou v řádech 10^{-4} pro poloviční zesílení a pro maximální zesílení je BER dokonce 1, takže ani zde nenastal kýžený výsledek.

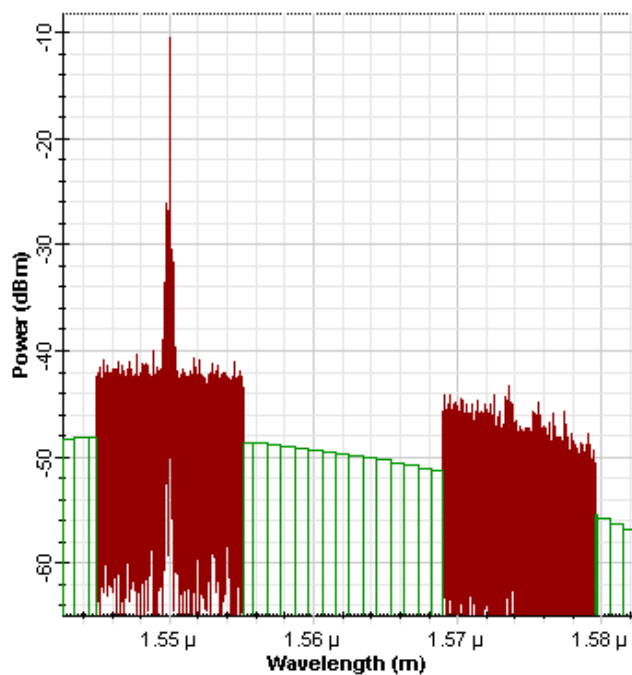
Při simulování zpětného směru (obrázky 5.20 a 5.21) je úroveň signálu dost vysoká na bezproblémový přenos, ale z diagramu oka (obrázek 5.22) a hodnoty BER 10^{-3} vyplývá, že přenos by možný nebyl.



Obr. 5.15: Simulace se SOA zesilovačem



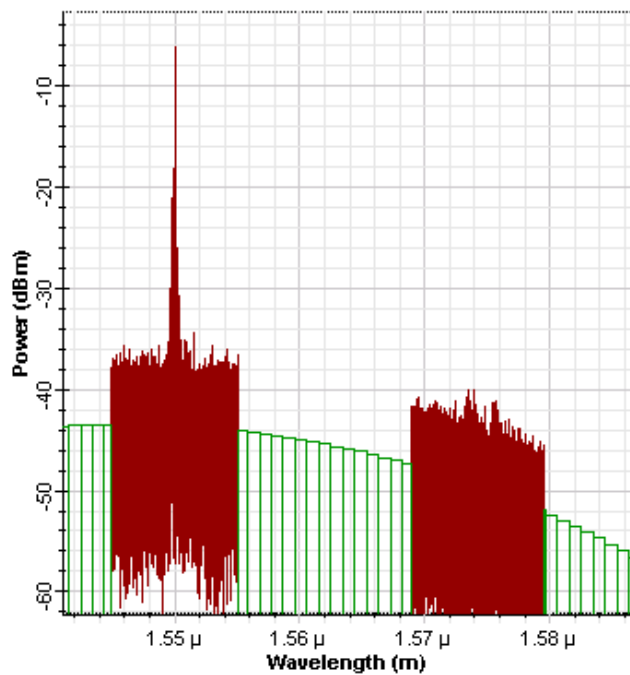
Optical Spectrum Analyzer_1



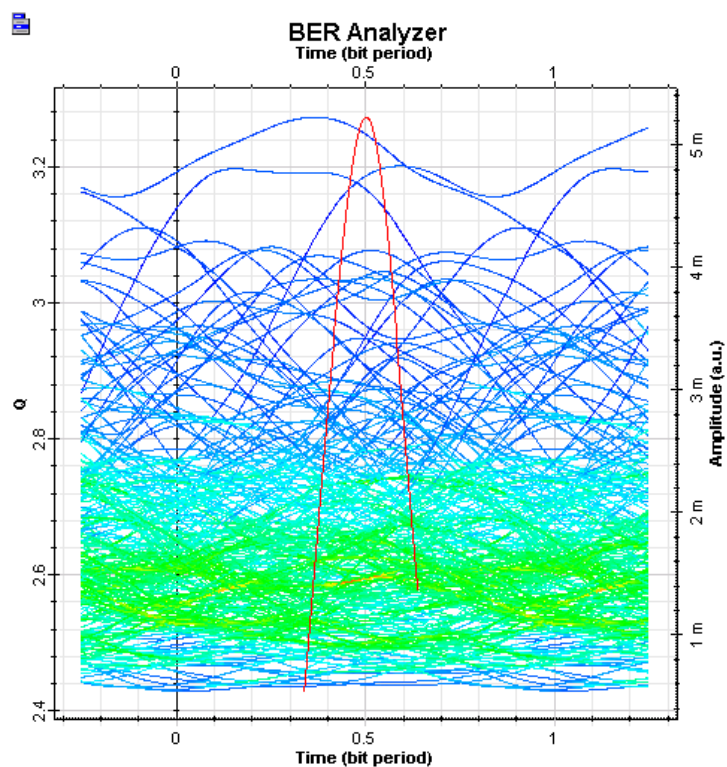
Obr. 5.16: Výstup ze SOA s polovičním zesílením



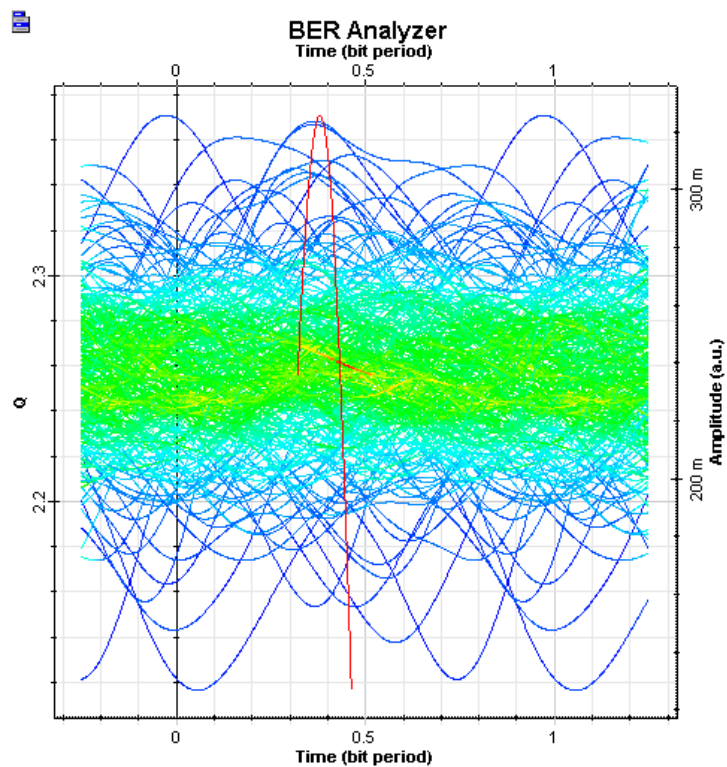
Optical Spectrum Analyzer_1



Obr. 5.17: Výstup ze SOA s maximálním zesílením



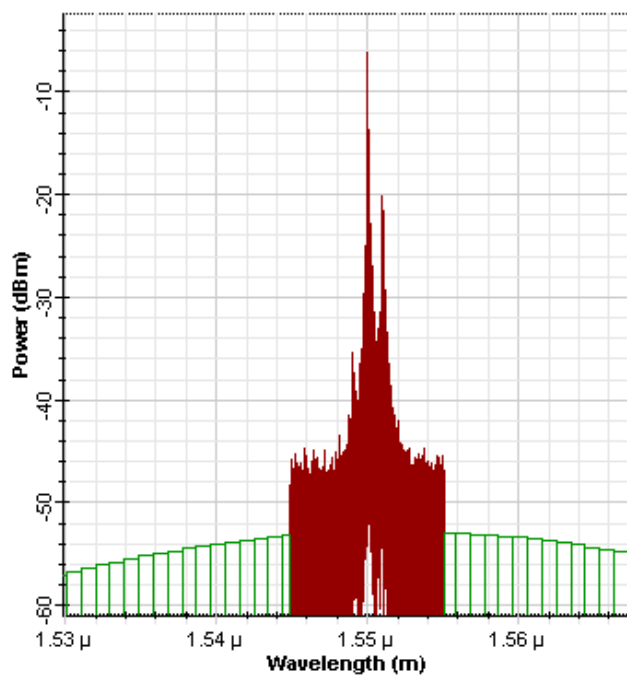
Obr. 5.18: Diagram oka při polovičním zesílení



Obr. 5.19: Diagram oka při maximálním zesílení



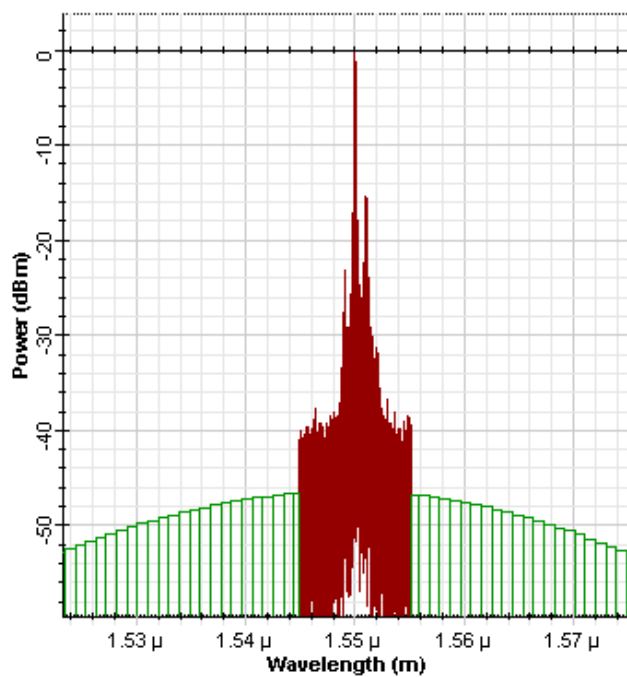
Optical Spectrum Analyzer_2



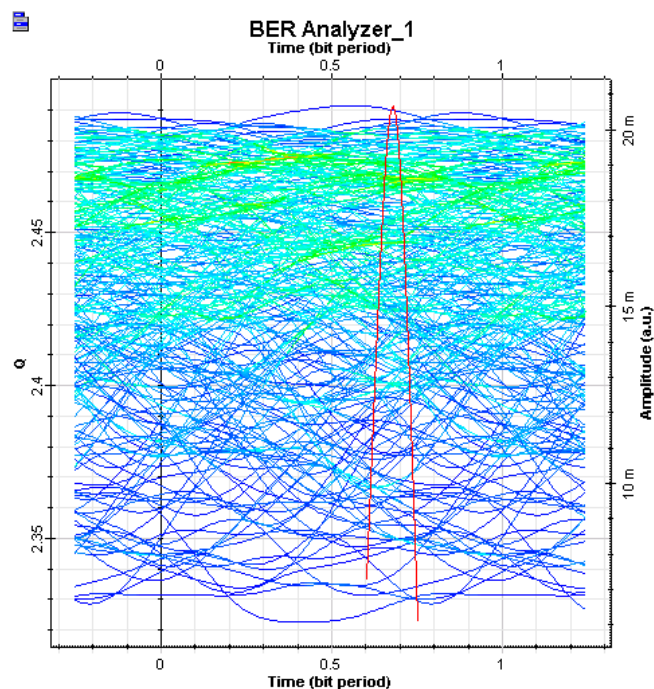
Obr. 5.20: Zpětný směr při polovičním zesílení



Optical Spectrum Analyzer_2



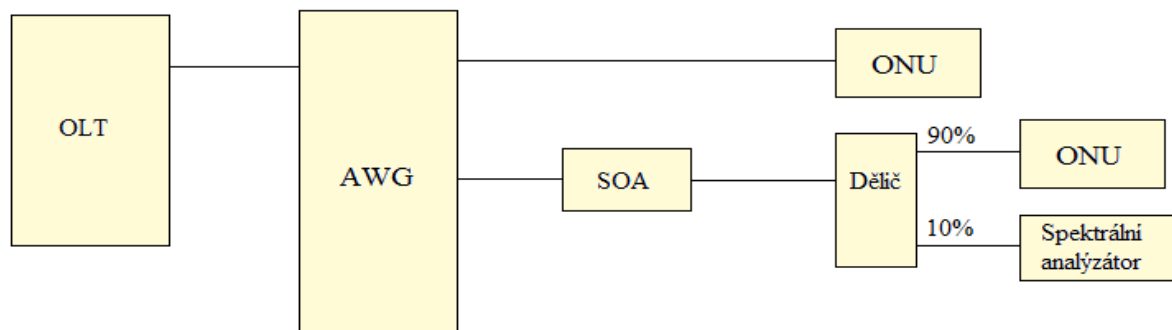
Obr. 5.21: Zpětný směr při maximálním zesílení



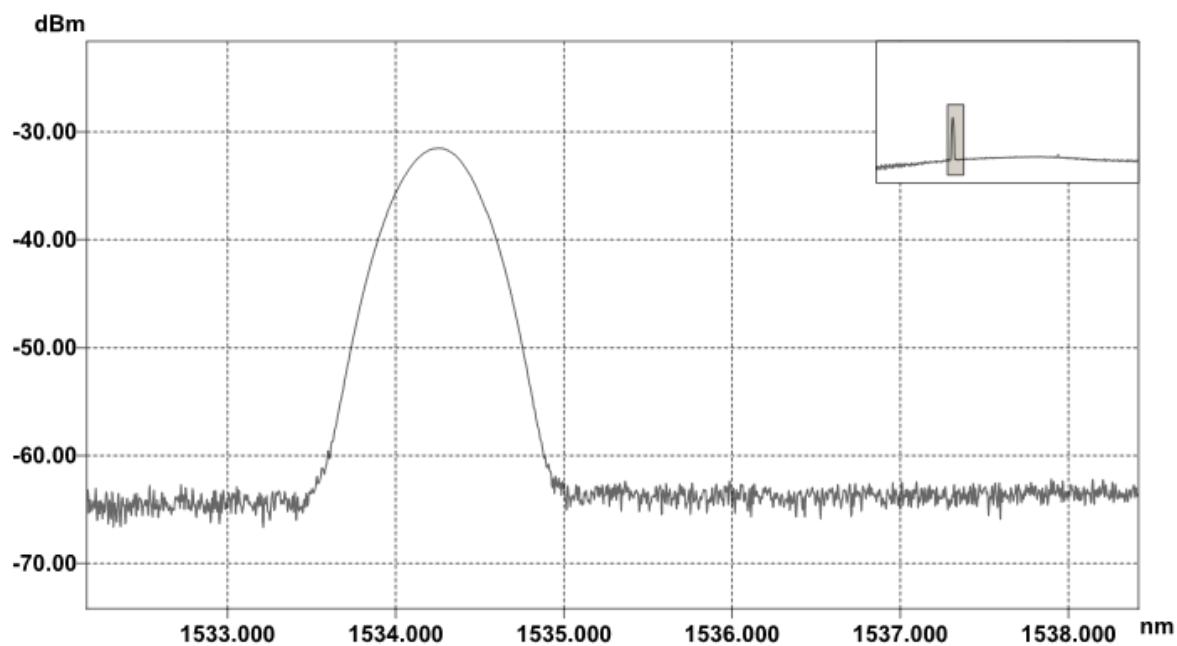
Obr. 5.22: Diagram oka ve zpětném směru a při maximálním zesílení

5.2.2 Reálné měření

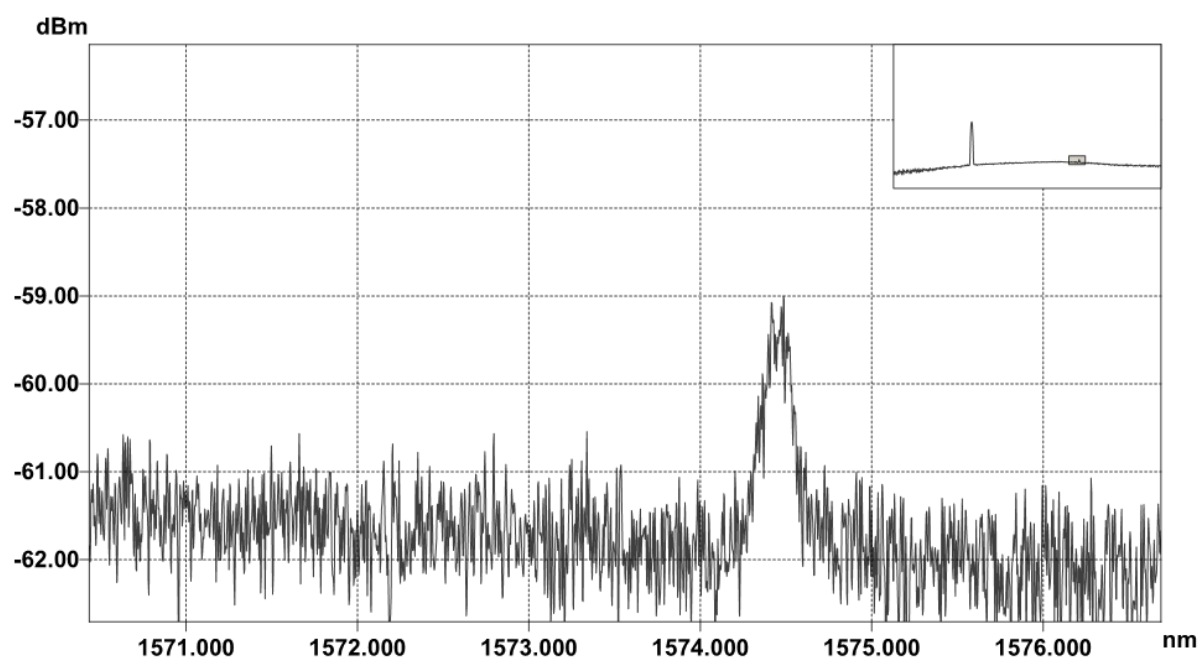
Na obrázcích 5.24 a 5.25 je jasně vidět, že polovodičový zesilovač i při plném zesílení nemůže konkurovat zesilovacím vlastnostem erbiovým zesilovačům. V C pásmu by to tolik nevadilo, jelikož ladící signál má dostatečnou úroveň, zato přeslech v L pásmu je znatelným až při velkém přiblížení a jeho úroveň je pouze 2 dB nad šumem, takže prakticky nerozeznatelný. Takže ani polovodičový zesilovač není správná volba. Při porovnání simulace s polovodičovým zesilovačem s reálným měření se výsledky výrazně rozcházejí. V simulaci hodnota přeslechu dosahuje -40 dBm, zato v reálném měření je ještě o 10 dB nižší.



Obr. 5.23: Schéma měření s polovodičovým zesilovačem



Obr. 5.24: Výstup z polovodičového zesilovače v C pásmu

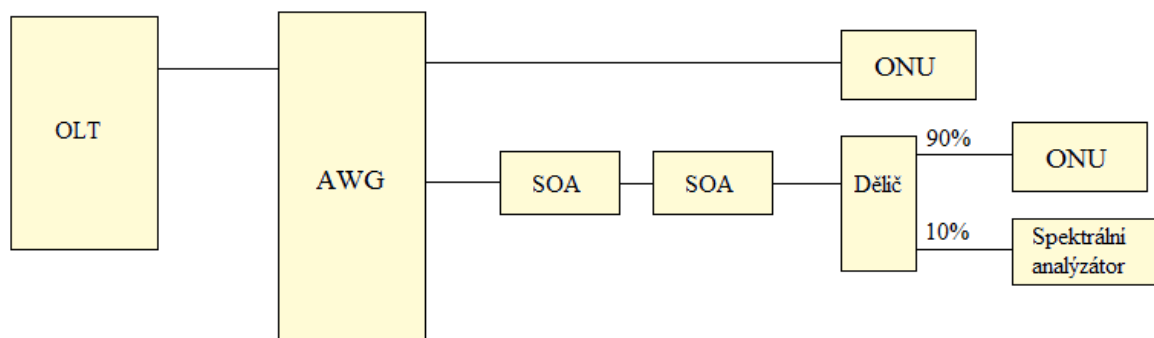


Obr. 5.25: Výstup z polovodičového zesilovače v L pásmu

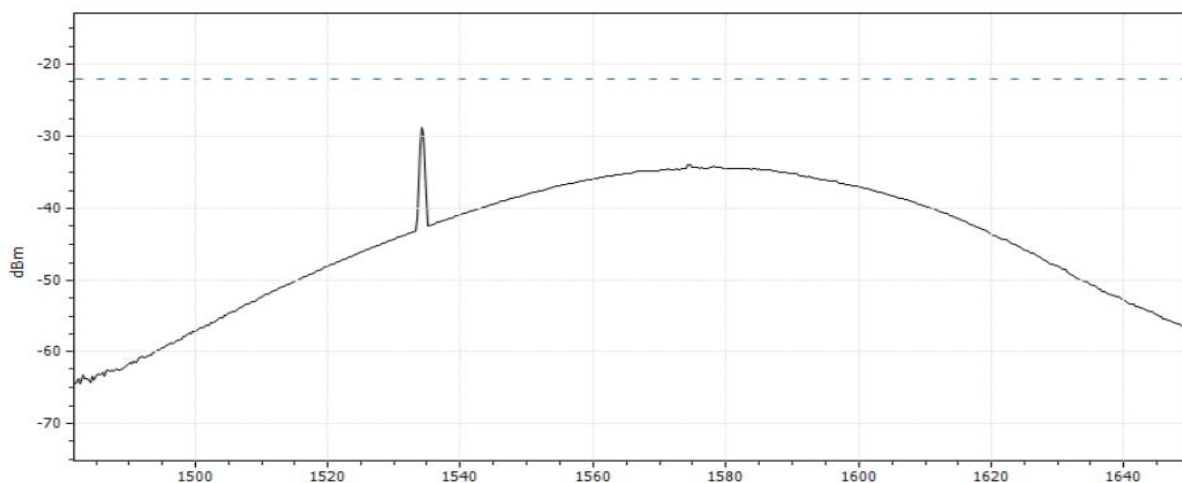
5.3 Zapojení se 2xSOA

5.3.1 Reálné měření

Když jeden polovodičový zesilovač má nedostatečné zesílení, tak dva polovodičové zesilovače sériově zapojené by mohly vyřešit tento problém. Takže další zapojení obsahuje 2 zesilovače a to ostatně lze vidět na obrázku 5.26.



Obr. 5.26: Schéma měření s dvěma polovodičovými zesilovači



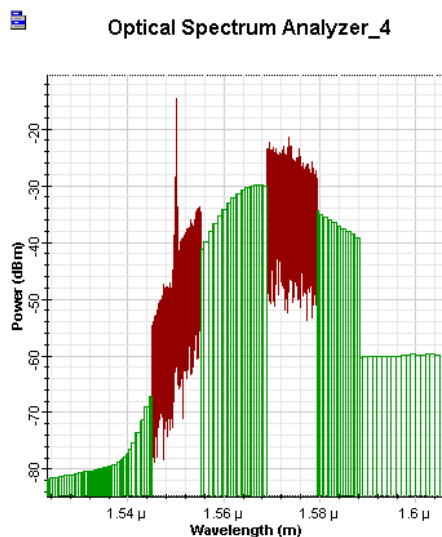
Obr. 5.27: Schéma měření s dvěma polovodičovými zesilovači

Jak se předpokládalo, tak v sériovém zapojení dvou polovodičových zesilovačů už není problém v úrovni zesílení, ale v tom, že SOA zesilovače mají velký šum a přeslech se v něm naprosto ztratil. Razantní zvýšení šumu lze vidět i na ladícím signálu, který už také není tak vysoko nad šumem, pouze 10 dB na místo normálních 30 dB.

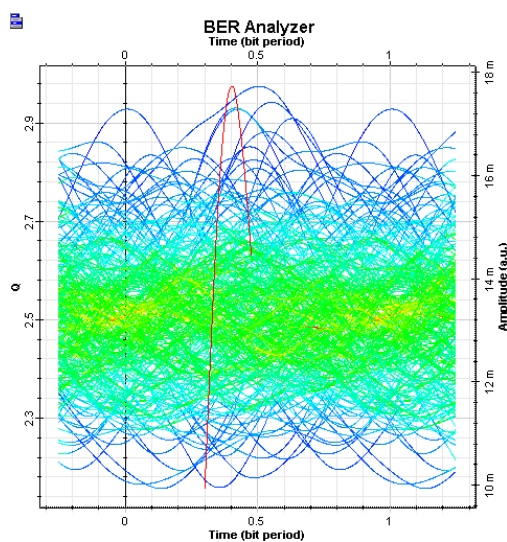
5.4 Zapojení se SOA+EDFA

5.4.1 Simulace

V poslední simulaci je zapojen polovodičový zesilovač a za něj EDFA. Jelikož je v zapojení opět EDFA, tak jsem musel přidat zpátky i dvojici cirkulátorů. Na obrázku 5.30 je snímek tohoto zapojení. Stejně jako v minulém zapojení i zde je průběh až do výstupu z AWG



Obr. 5.28: Signál za dvojici zesilovačů

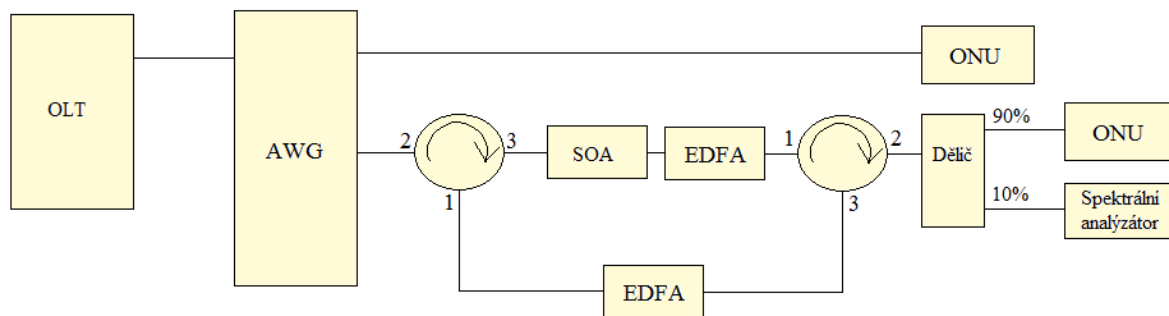


Obr. 5.29: Diagram oka za ONU

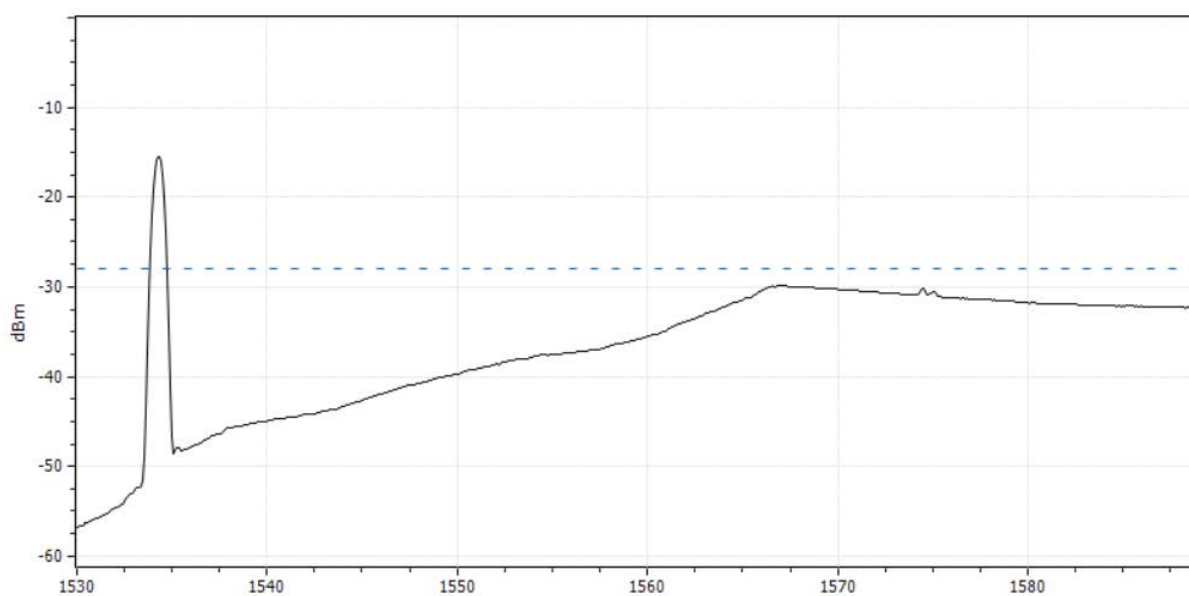
stejný, proto jsou přeskočeny. Obrázek 5.28 zobrazuje úroveň signálu za oběma zesilovači. Na první pohled je vidět, že propojení dvou zesilovačů za sebe zvýšilo výrazně úroveň signálu, až na úroveň téměř -20 dBm. Hodnota BER se pohybuje v řádu 10^{-3} , takže i tento pokus o kvalitní zesílení přeslechu se nepodařil.

5.4.2 Reálné měření

Poslední možností bylo zkombinování prvních dvou variant a zkusit zapojit polovodičový zesilovač a za něj zesilovač EDFA. Zapojení je díky zesilovači EDFA zase o trošičku složitější a nakresleno je na obrázku 5.31.

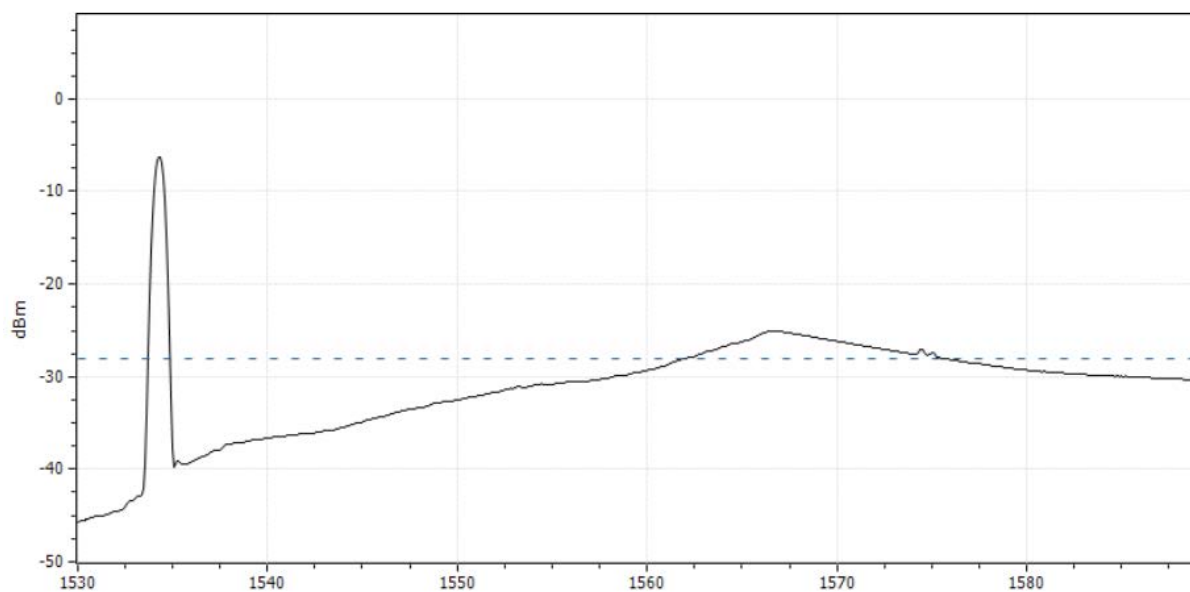


Obr. 5.31: Schéma měření se SOA a EDFA zesilovači

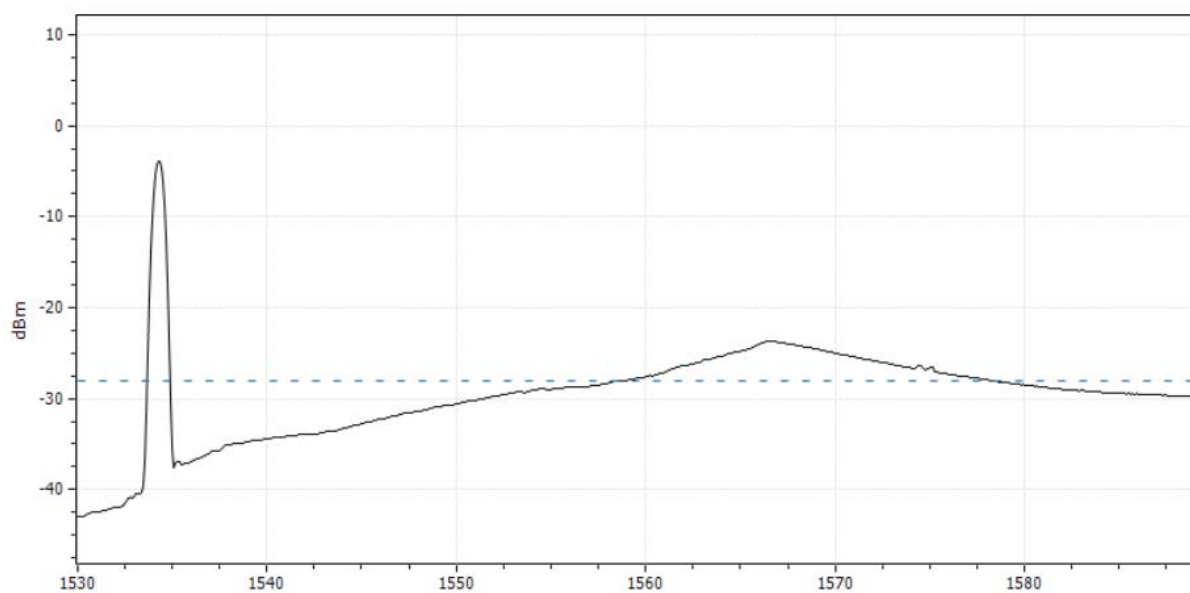


Obr. 5.32: Výstup ze SOA a EDFA zesilovačů se zesílením 10 dB

Z obrázků 5.32, 5.33 a 5.34 je vidno, že ani tento pokus se nesetkal s úspěchem. I když se L pásmo zesílilo, tak požadovaný přeslech namísto aby se ukázal, tak se ztratil a EDFA pak už neměla šanci situaci zlepšit při jakémkoliv zesílení. I při tomto zapojení se simulace neshoduje s realitou jak v C tak i v L pásmu. C pásmo má při reálném měření o 20 dB vyšší úroveň a signál v L pásmu má asi o 5 dB vyšší úroveň.



Obr. 5.33: Výstup ze SOA a EDFA zesilovačů se zesílením 15 dB



Obr. 5.34: Výstup ze SOA a EDFA zesilovačů se zesílením 20 dB

6 ZÁVĚR

Problematika bezpečnosti je a bude stále aktuální, proto si myslím, že se má smysl se tímto tématem dále zabývat, jelikož jsem nenašel, že by někdo tuto problematiku zpracoval, tak si myslím, že moje výsledky mohou být přínosné. Zpracování tohoto tématu pro mě bylo velmi přínosné, protože jsem si vyzkoušel práci s mnohými přístroji a ověřil, jak to je s bezpečností v pasivních optických sítích. I přes všechny indicie naznačující, že by mělo být možné u AWG zachytit přeslechy z vedlejších kanálů se mi to prokázat nepodařilo. Výsledky ze simulací nebyly dostatečně průkazné, proto jsem dopředu netušil, jak to při reálném měření dopadne. Měření jsem prováděl na DWDM, takže není vyloučeno, že při nasazení nové normy (např.: UDWDM) nebude tento problém znovu aktuální a reálnější než v dnešní době. Pro měření jsem měl k dispozici kvalitní EDFA zesilovač s vysokým zesílením, ale není vyloučeno, že s ještě lepším, profesionálním zařízením by se odposlechy realizovat podařilo. Můj závěr je ale takový, že systém WDM-PON považuju za bezpečnou síť z hlediska přeslechů.

LITERATURA

- [1] *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 3.5.2015 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pasivn%C3%AD_optick%C3%A1_s%C3%AD%C5%A5.
- [2] ŽAK, O. *Návrh přístupové optické sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 80 s., 3 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Reichert.
- [3] FS.COM. *Blog of FS.COM*. [online]. 13.5.2015 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.fs.com/blog/abc-of-pon-understanding-olt-onu-ont-and-odn.html>.
- [4] Akademie věd české republiky. *EDFA I.*
- [5] Elektorevue. *Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2011*. ISSN 1213-1539.
- [6] Optokon. *CLA - Czech Light Amplifier devices*. [online]. 4.9.2009 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: [http://www.e-trd.ru/userfiles/File/files/262_Volokonno-opticheskij_usilitel_CLA_\(eng\).pdf](http://www.e-trd.ru/userfiles/File/files/262_Volokonno-opticheskij_usilitel_CLA_(eng).pdf).
- [7] Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR. *Fenomenologická teorie polovodičových optických zesilovačů*.
- [8] Access server. *Praha: České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2009*. ISSN 1214-9675.
- [9] Pandatron.cz. *Praha: České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2010*. ISSN 1803-6007.
- [10] JAVOŠ, M. *AWG multiplexor/demultiplexor v DWDM systémech*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině. Elektrotechnická fakulta, 2008. 48 s., 5 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Erik Gemzický.
- [11] BOHÁČ, L., LUCKI, M. *Optické komunikační systémy : přednášky*. Miloš Schlitter, CSc. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2010. 165 s. ISBN 978-80-01-04484-1.
- [12] LUCKI, M. *Optické zesilovače* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf.
- [13] Thorlabs. *L-Band Booster Optical Amplifiers*. [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3991&pn=B0A1080S#4001.
- [14] Thorlabs. *C-Band Booster Optical Amplifiers*. [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3901.

Součástí DP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

- DP_NAV0047.pdf
- Simulace.zip